

35670

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARBE GERİLİMİNDE
SIKIŞTIRILMIŞ GAZLARDA DELİNME**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Hasbi İSMAİLOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Eylül 1996

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Aralık 1996

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muzaffer ÖZKAYA

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet RUMELİ

Prof. Dr. Yılmaz ÖZKAN

Prof. Dr. Sezai DİNÇER

Doç. Dr. Kevork MARDİKYAN

18.12.1996

M. Z. Kaya

18.12.96

Y. İsmailoğlu

S. Dinçer

V. Mardikyan

18/12/96

ARALIK 1996

ÖNSÖZ

Yüksek gerilim tekniğinde gazlarda boşalma olayları, ayrıcalıklı bir yer tutmaktadır. Bu tez çalışması bu konudaki güncel gelişme ve çalışmalara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışılan gaz türleri ve gerilim biçimi teknik alandaki araştırmalara katkıda bulunacak biçimde seçilmiştir.

Bu tez çalışması süreci ile okuma, araştırma, deneme, bilimsel çalışma gibi konularda yetiştirme ve gelişmeye olanak sağlayan, ilgi ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli hocam Prof.Dr. Muzaffer ÖZKAYA'ya çok teşekkür ederim.

Değerli görüş ve önerilerinden sürekli olarak yararlandığım kıymetli hocam Prof. İzzet GÖNENÇ'e, çalışmamın tüm aşamalarında ve tezin biçimlendirilmesinde çok değerli katkılarını gördüğüm değerli arkadaşım Y.Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ'ye en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR ve Y.Mim. Hülya KUŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmamı maddi ve manevi olarak destekleyen Elginkan Vakfı'na da teşekkürü bir borç bilirim.

Sürekli ilgi, destek ve anlayışı, çalışmalarım sırasında da gösteren başta eşim olmak üzere tüm yakınlarıma teşekkür ediyorum.

Eylül, 1995

Y. Müh. Hasbi İSMAİLOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
SEMBOLLER	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. DÜZGÜN OLMAYAN ALANDA	
GAZLARDA BOŞALMA OLAYLARI	10
2.1. Giriş	10
2.1.1. Klasik Gaz Yasaları	10
2.1.2. Bir Molekül Kümesinin Hız Dağılımı	14
2.1.3. Molekül ve Elektronların Serbest Yolu	16
2.1.4. Serbest Yol Dağılımı	19
2.1.5. Çarpışmada Enerji Aktarımı	21
2.2. İyonizasyon Türleri	24
2.2.1. Foto İyonizasyon	25
2.2.2. Çarpma Sureti İle İyonizasyon	25
2.2.3. Termik İyonizasyon	25
2.2.4. Yüzeysel İyonizasyon	26
2.3. Boşalmada Kanal Teorisi	29
2.4. Düzgün Olmayan Alanda Delinme	33
BÖLÜM 3. KÜRE-DÜZLEM ve KÜRE-PÜRÜZLÜ DÜZLEM	
ELEKTROT SİSTEMLERİNDE	
ELEKTRİKSEL ALAN HESABI	35
3.1. Küre-Düzlem Elektrot Sisteminde	
Yaklaşık Alan Hesabı	35
3.2. Düzgün Alanda İletken Bir Yarım Kürenin	
Dışında Alan Şiddeti	37
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Küre-Düzlem ve	
Küre-Pürüzlü Düzlem Elektrot Sistemlerinde	
Elektriksel Alanın İncelenmesi	38
3.3.1. Problemin Silindirsel Koordinat	
Sisteminde İncelenmesi	39
3.3.2. Elektrostatik Enerji	40

3.3.3.	Problemin Formülasyonu	40
3.3.4.	Elektrik Alan Şiddeti Hesabı	48
3.3.5.	Yinelemeli Çözüm	48
3.3.6.	Küre-Düzlem ve Küre-Pürüzlü Düzlem Elektrot Sistemlerinde Potansiyel Dağılımı ve Maksimum Alan Şiddeti	49
BÖLÜM 4.	DARBE GERİLİMİNDE HAVA, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ GAZLARINDA DELİNME GERİLİMİNİN DENEYSEL OLARAK SAPTANMASI	54
4.1.	Deney Düzeni	54
4.1.1.	Elektrot Sistemi	54
4.1.2.	Basınç Sistemi	55
4.1.2.1.	Basınç kabı	55
4.1.2.2.	Vakum pompası	55
4.1.2.3.	Manometre	56
4.1.3.	Darbe Gerilimi Üretici	56
4.1.4.	Darbe Gerilimlerinin Ölçülmesi	57
4.1.5.	Atlama Geriliminin Belirlenmesi	58
4.2.	Deneylerin Yapılışı	59
BÖLÜM 5.	DENEY SONUÇLARI	61
5.1	Farklı Basınçlarda Darbe Delinme Geriliminin Elektrot Açıklığı ile Değişimi	61
5.1.1.	Hava için $U_a = f(a)$ Eğrileri	61
5.1.2.	N ₂ için $U_a = f(a)$ Eğrileri	66
5.1.3.	SF ₆ için $U_a = f(a)$ Eğrileri	70
5.1.4.	SF ₆ +N ₂ için $U_a = f(a)$ Eğrileri	74
5.2.	Farklı Elektrot Açıklıklarında Darbe Delinme Geriliminin Basınçla Değişimi	90
5.2.1.	Hava için $U_a = f(b)$ Eğrileri	90
5.2.2.	N ₂ için $U_a = f(b)$ Eğrileri	94
5.2.3.	SF ₆ için $U_a = f(b)$ Eğrileri	98
5.2.4.	SF ₆ +N ₂ için $U_a = f(b)$ Eğrileri	102
5.3.	Sabit Basınçta Farklı Elektrot Açıklıklarında Darbe Delinme Geriliminin SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımındaki SF ₆ Oranı ile Değişimi	118
5.4.	Sabit Elektrot Açıklığında Farklı Basınçlarda Darbe Delinme Geriliminin SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımındaki SF ₆ Oranı ile Değişimi	138
BÖLÜM 6.	DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	158
6.1.	Hava, N ₂ , SF ₆ ve SF ₆ +N ₂ Gazları için Sabit Basınçlarda Darbe Delinme Gerilimlerinin Elektrot Açıklığı ile Değişimlerinin Karşılaştırılması	158
6.2.	Hava, N ₂ , SF ₆ ve SF ₆ +N ₂ Gazları için Sabit Elektrot Açıklıklarında Darbe Delinme Gerilimlerinin Basınçla Değişimlerinin Karşılaştırılması	179

BÖLÜM 7. GERİLİM ve AKIM OSİLOGRAMLARI ve BOŞALMA FOTOĞRAFLARI	199
7.1. Osilogramlar ve Boşalma Fotoğrafları.....	199
7.2. Osilogramların ve Boşalma Fotoğraflarının İrdelenmesi.....	206
BÖLÜM 8. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI ve DEĞERLENDİRİLMESİ.....	207
8.1. Havada $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi.....	207
8.2. N_2 'de $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi.....	208
8.3. SF_6 'da $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi.....	209
8.4. SF_6+N_2 'de $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi.....	210
8.5. Gaz Karışımındaki SF_6 Oranına Bağlı Olarak Elde Edilen Eğrilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	211
8.6. Sabit Basıncıta ve Sabit Açıklıkta Karşılaştırmalı Eğrilerin Değerlendirilmesi	213
8.7. Deney Sonuçlarının Fiziksel Yorumu	216
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	218
KAYNAKLAR	221
EKLER	229
EK A	229
EK B	231
ÖZGEÇMİŞ	233

ÖZET

Darbe geriliminde gazların delinmesi üzerine yapılan bu çalışmada düzgün olmayan alan dağılımına sahip elektrot sistemlerinden biri olan küre-düzlem elektrot sistemi üzerinde çalışılmıştır. Uygulamada ortaya çıkan elektrot yüzey pürüzlülüğünün delinme gerilimine etkisi, küre-düzlem elektrot sisteminin düzlem elektrodu üzerinde boyutları, biçimi ve konumu belirli bir pürüzün varlığı ile göz önüne alınmıştır. Çalışmada, pürüzlülüğün etkisinin araştırılması planlandığından incelemeler, makroskobik boyutlarda yarı küresel iletken tek bir pürüz ile gerçekleştirilmiş ve pürüzün olması ve olmaması durumları değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, darbe geriliminde hava, N_2 ve SF_6 gazları ile SF_6+N_2 gaz karışımlarında, düzgün olmayan alanda, pürüzsüz ve pürüzlü elektrot sistemlerinde, elektrot açıklığının, gaz basıncının, gerilim kutbiyetinin ve pürüzün varlığının delinme gerilimlerine etkileri incelenmiştir.

Çalışmada ele alınan küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerine ilişkin elektrik alan dağılımları, hem analitik hem de sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi ile kuramsal olarak incelenmiştir. Darbe geriliminde, U_a %50 atlama gerilimleri, literatürde önerilen yöntemler geliştirilerek, en küçük kareler yöntemine göre birinci dereceden eğri (doğru) uydurma yolu ile belirlenmiştir.

Gaz yalıtkanların, uygulamada farklı basınç ve elektrot açıklıklarında kullanılmaları göz önüne alınarak basınç ve elektrot açıklığı parametre olarak seçilmiş ve basınç 0-4 bar aralığında, elektrot açıklığı ise 5-25 mm aralığında değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, ortam sıcaklığında yapılmıştır.

Darbe geriliminin kullanılması ile hava, N_2 ve SF_6 ile SF_6+N_2 karışımları ile yalıtılmış, alan dağılımı düzgün olmayan pürüzlü ve pürüzsüz elektrot düzenlerinin, yıldırımdan kaynaklanan darbe karakterindeki aşırı gerilimlere karşı davranışını ve bu davranışta aşırı gerilimin kutbiyetinin etkisini görme olanağı elde edilmiş ve her iki kutbiyetin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği gösterilmiştir.

SUMMARY

BREAKDOWN IN COMPRESSED GASES UNDER IMPULSE VOLTAGES

Particularly, recent demands for more compact apparatus are making it necessary to design the insulated equipment with higher electrical stresses than conventional equipment. This makes it an important requirement to attain higher insulation strength and higher insulation reliability. The general criteria for judging the quality of gas insulation can be arranged according to their degree of importance:

- high dielectric strength,
- good behavior in inhomogeneous electric fields,
- a low level of induced over voltages during electric discharge,
- high relative impulse strength,
- great chemical stability, reversibility after the electric arcs,
- high vapor pressure,
- low toxicity and
- acceptable price.

To date, no insulator has been found to have properties better than sulphur hexafluoride (SF_6). Therefore, SF_6 is the most commonly used insulating gas. SF_6 has a high electric strength, low toxicity, is chemically inert and has good heat transfer properties. Its relatively large cross section for attaching low-energy electrons under electrical stress inhibits the initiation and growth of electrical discharges. These properties allow a reduction in size and enhance the reliability of high voltage equipment.

However, when compressed SF_6 was first introduced as an electrical insulant in high voltage power equipment, it was discovered that the insulation strength of the system was less than that predicted by theory. An explanation for this apparent reduction in the dielectric strength of compressed SF_6 can be given by considering the perturbations of the macroscopic electric field produced either by the microscobic roughness of the electrode surface or by conducting particles. In SF_6 insulated equipment, the dielectric strength is often lowered by factors of 2 to 10 by unavoidable contaminating particles, especially of long slender shape and conducting material. That such perturbations of the electric field should play a major role in the dielectric

strength of SF₆ is due to the effective coefficient of ionization $\bar{\alpha}$ being a strongly varying function of the electric field strength E, particularly for $E=E_{lim}$ is the value for which $\bar{\alpha}=0$.

On the other hand high cost and toxic byproducts can be remarked as the other major disadvantages of SF₆. Therefore, owing to the stated deficiencies, there has been much effort to develop alternative electronegative gases and gas mixtures with improved insulating behavior at reduced costs.

As is well known, SF₆ is a strongly electronegative gas, but it can only remove free electrons effectively with energies in the low-energy range by the electron attachment process. On the other hand, the electron attachment cross sections for some perfluorocarbons such as C-C₄F₈ are substantially higher than that for SF₆ in the higher energy range. Moreover, many perfluorocarbons have higher dielectric strength than SF₆. Therefore, gas mixtures comprising SF₆ may have a higher dielectric strength than pure SF₆.

Sulphur-hexafluoride (SF₆) and its mixtures with other less expensive gases such as air, N₂, and CO₂, etc. are being investigated in recent years. Breakdown characteristics of SF₆ mixtures with N₂, air, and CO₂ are reasonably well understood for uniform and quasi-uniform field gaps. However, there is still insufficient information regarding the impulse breakdown of such mixtures in non-uniform field gaps. Impulse breakdown characteristics of negative rod-plane gaps have been investigated for SF₆-N₂, SF₆-air, and SF₆-H₂ mixtures.

Experimental investigations on to the effect of electrode surface roughness upon the dielectric strength of strongly electronegative gases have adopted two different approaches, viz. (a) the use of geometrically well-defined artificial protrusions mounted on plane electrodes and (b) the use of an electrode having a surface finish comparable with that related to production processes, but which in comparison to (a) is ill-defined.

The latter approach represents, with respect to insulation strength, the normal operating situation and thus results obtained from any investigation into the dielectric behavior of a gas are directly applicable to practical situation. Owing to the complex structure of the electrode surfaces utilized, we are unable to derive any information about the associated field perturbations, and hence a deeper analysis of the results cannot be undertaken. The former approach provides a well-defined perturbation of the macroscopic electric field, and thus lends itself to an analysis of, for example, onset conditions.

An analysis can be used to determine the relevant dimensions of artificial protrusions. These dimensions are found to be comparable with those of the roughness associated with production processes. To-date however, the

dimensions of the artificial protrusions employed have all been much greater. This suggests an inability to obtain protrusions of the relevant dimensions. Consequently, as available artificial protrusions are unrepresentative of artificial conditions, results from investigations using such protrusions are not necessarily applicable to practical conditions.

In this thesis the strength of several gas and gas mixtures, under lightning overvoltages was experimentally investigated. The experiments were carried out with sphere-plane field configurations placed in a plexiglas pressure vessel. The sphere electrode, which had a radius of 2 mm was made of brass. The lower plane electrodes were made of rounded brass plates of 75 mm diameter and one of them was with a protrusion on the center.

The electrode gap spacings in investigation were varied within a range of 5 mm to 25 mm. The gap spacings were set under pressure using special measuring scales from outside the vessel.

The partial pressures as well as the total pressure were measured using mechanical gauges with an accuracy of 1%. The gas mixtures were left at least 2 h before the application of the tests in order to obtain uniform gaseous mixture.

Prior to each experiment, the electrodes were treated with metal polish and cleaned carefully with CCl_4 . The vessel was then evacuated to a pressure less than 10^{-1} torr for thirty minutes. And then the vessel was filled with gas to a certain pressure. In order to condition the electrode surfaces, 10 unrecorded impulses were applied at the beginning stage of each series of experiments.

Sufficient time (~ 30 sec.) is allowed between each flashover test so that the gas or gas mixture could completely recover to its original state after flashover. The ambient temperature during the experiments were about 20 ± 6 °C.

The experimental pressures extended over a range from about 0 to 4 bars corresponding to the pressure ranges of practical equipments. The 50% breakdown values were obtained using the "up and down" method and curve fitting method of first order, based on the least mean squares.

At each pressure, impulse breakdown voltages for both negative and positive polarities were measured.

Variations of positive and negative impulse breakdown voltages with gap spacings for the sphere-plane electrode arrangement at 4 atm are shown in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. And also the variations of positive and negative

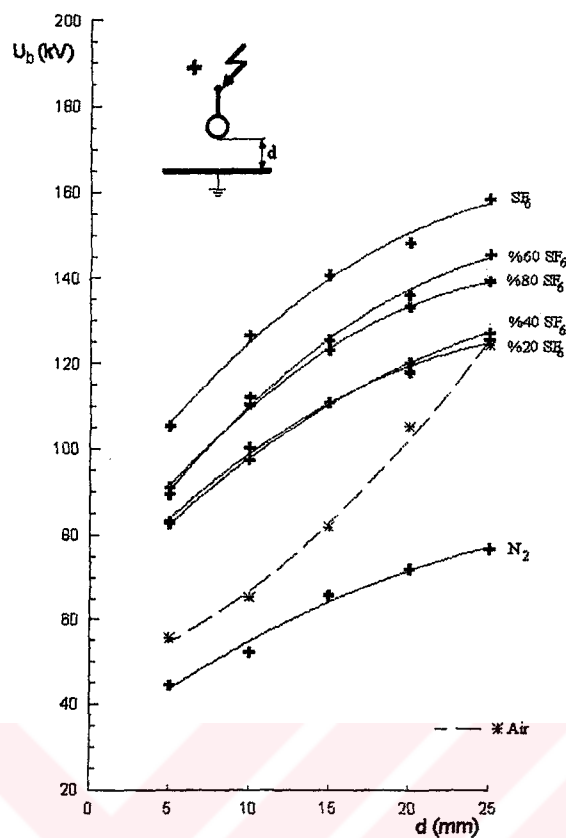


Fig. 1. Curves of $U_b=f(d)$. ($p=4$ atm.)

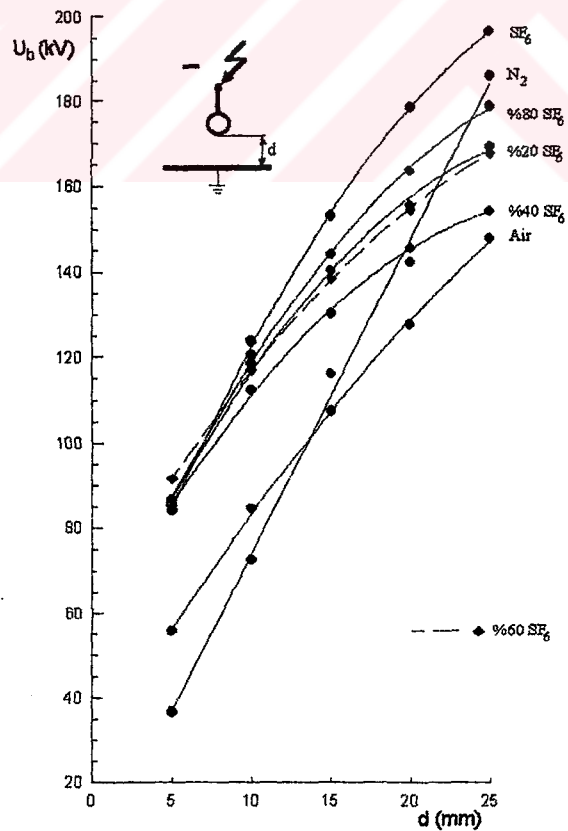


Fig. 2. Curves of $U_b=f(d)$. ($p=4$ atm.)

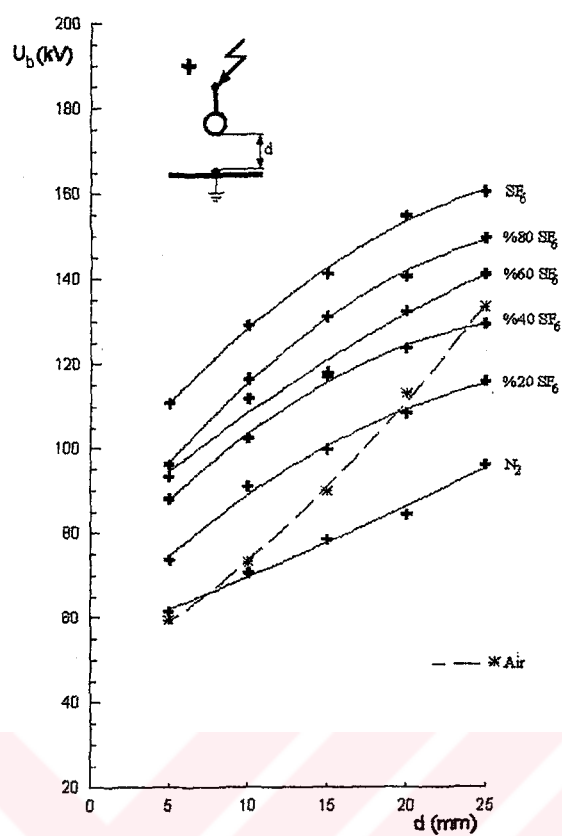


Fig. 3. Curves of $U_b=f(d)$. ($p=4$ atm.)

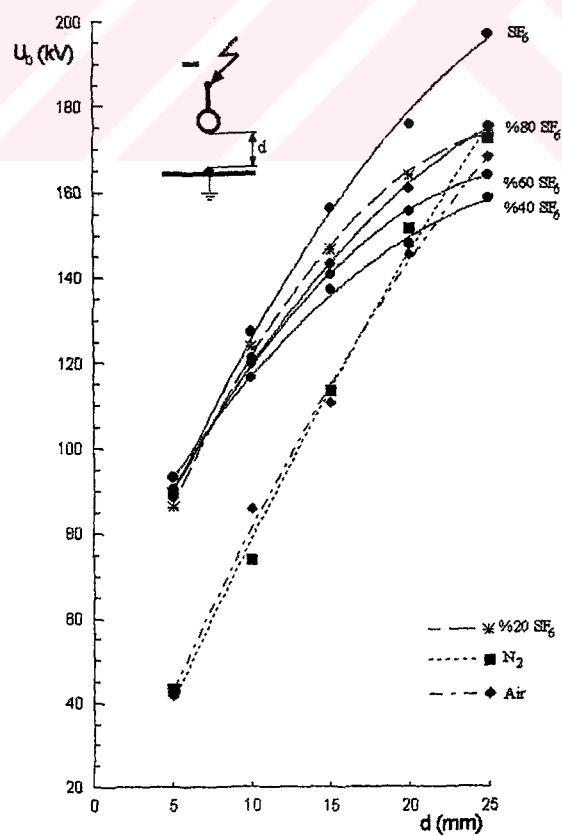


Fig. 4. Curves of $U_b=f(d)$. ($p=4$ atm.)

impulse breakdown voltages with gap spacings for the sphere-plane electrode with protrusion arrangement at 4 atm are shown in Fig. 3 and Fig. 4, respectively.

It is clear from Fig. 1 and 3 that positive impulse breakdown voltages of SF₆-N₂ mixtures increase with increasing SF₆ content, and the breakdown voltages of N₂ and SF₆ being the lowest and the highest respectively.

Experimental Set Up

A brief description of the arrangement is as follows:

Gas Supply System

Gas supply system comprises a vacuum pump, a compressor and several valves and manometers.

Pressure Vessel

The pressure vessel is made up of cylindrical insulating perspex tube of 120 mm diameter and exhibits an inner volume of 5.5 liters. It can be evacuated to a pressure less than 0.8×10^{-4} bar and pressurized up to 5 bar. The bottom base and the top lid are made of aluminum with edges rounded off to avoid the formation of corona discharges. Investigations can be carried out by using this transparent perspex vessel up to the crest value of 250 kV, which has an advantage of visual observation of the flashovers and breakdown from outside and requiring no bushing.

Impulse Voltage Generator

The impulse voltages were supplied from an 260 kV, 100 Ws (J) two stage impulse generator. The impulse voltage wave shape was 1.2/50 μ s. Both negative and positive impulse voltages were used in the study. The measuring system included a 2x140 kV (1200 pF) capacitive voltage divider and a storage impulse voltmeter (MWB type DSTM).

SEMBOLLER

a	: Elektrod açıklığı
α	: Elektronun iyonlaştırma sayısı
$\bar{\alpha}$	: Etkin iyonlaşma sayısı
b	: Gaz basıncı
C	: Kapasite
E	: Elektrik alan şiddeti
E_0	: Ortalama elektrik alan şiddeti
E_r	: Radyal elektrik alan şiddeti
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik katsayısı ($8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ϵ	: Gazın dielektrik katsayısı
γ	: Pozitif iyonun katoddan kopardığı elektron sayısı
η	: Elektronun yakalanma katsayısı; elektrod sisteminin verimi
I_0	: Başlangıç foto elektrik akımı
I	: Elektrik akımı
$\bar{\lambda}$	: Ortalama serbest yol
n_x	: Katoddan x uzaklığındaki elektron sayısı
k	: Düzeltme faktörü
n_0	: Başlangıç elektron sayısı
N_i	: İyon yoğunluğu
N_{kr}	: Kritik yük sayısı
Q	: Elektrik yükü
r	: Elektron çığının yarıçapı; elektrodun eğrilik yarıçapı
t	: Zaman
S	: Yüzey alanı
U	: Gerilim
U_a	: Delinme gerilimi
x	: Uzaklık değişkeni
x_{kr}	: Kritik çığ uzunluğu
V	: Potansiyel
W	: Enerji

BÖLÜM 1

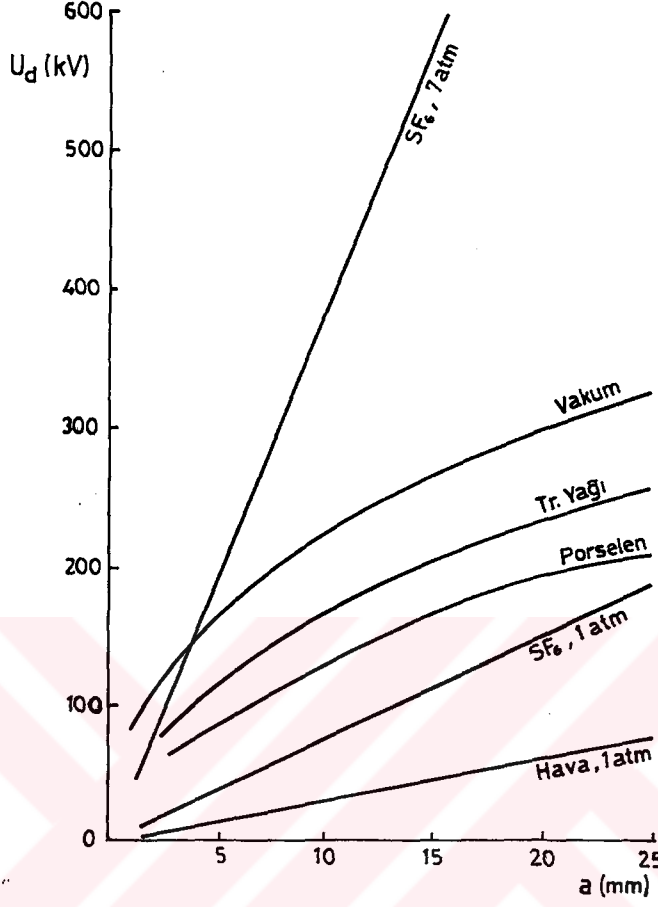
GİRİŞ

Yoğun şehirleşme ve sanayileşmeye paralel olarak, dağıtımda daha büyük güçlere gereksinim duyulması, elektrik enerjisinin iletiminde kullanılan gerilim düzeylerinin yükselmesine, yüksek gerilim iletim ve dağıtım tesis boyutlarının büyümesine yol açmakta ve sistem güvenilirliğini önemli kılmaktadır. Bu taleplerin karşılanması, uygun tasarımıyla, dolayısıyla tasarımın temel taşlarından biri olan yalıtım ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Yalıtımın ana malzemeleri, katı, sıvı, gaz yalıtkanlar ve vakumdur.

Bu dört temel yalıtım ortamından, özellikle sıkıştırılmış SF_6 gibi gazlar, yüksek delinme dayanımı ile birlikte önemli üstünlükler sağlarlar. Delinme dayanımları bakımından karşılaştırmalı bir fikir vermek üzere, düzgün alanda bazı katı, sıvı ve gaz yalıtkanlarla vakumun doğru gerilimde delinme dayanımları, şekil 1.1'de gösterilmiştir [1].

Gaz yalıtımından beklenen genel özellikler, önem derecelerine göre, yüksek delinme dayanımı, düzgün olmayan elektrik alanlarında kararlı davranış, yüksek darbe dayanımı, elektriksel ark ardından yalıtımı yeniden kazanabilme (özönarım), yüksek buhar basıncı, kimyasal kararlılık, zehirli olmama, çevreye olumsuz etkisi olmama, ucuz ve kolay elde edilebilme olarak sayılabilir. SF_6 , günümüze kadar bulunan ve söz konusu özellikleri sağlayan en iyi gaz yalıtkanlardan biridir [2]. Bununla birlikte, uygulamaya bağlı olarak, gaz yalıtım özelliklerinden bazıları göz ardı edilerek optimum bir çözüm elde edilebilir.

Özellikle, son zamanlarda aygıtların daha karmaşık yapıda olmaları, sıradan aygıtlara göre çok daha yüksek elektriksel dayanımlı tasarımlarını gerektirmektedir. Bu ise, daha yüksek delinme dayanımına ve daha yüksek güvenilirliğe ulaşılmasını önemli kılmaktadır.



Şekil 1.1. Düzgün alanda bazı katı, sıvı ve gaz yalıtkanlarla vakumun delinme dayanımının doğru gerilimde elektrot açıklığı ile değişimi.

Çoğunlukla elektriksel yalıtımda ve başlıca açma-kapama aygıtlarında yaygın olarak kullanılan SF₆ gazı, çevreci bir gaz olarak değerlendirilmektedir. Havaya karışması durumunda sera etkisine bağlı katkısının %0,01'den ve stratosfer ozonundaki azaltıcı etkisinin 10⁻⁷'den küçük olduğu belirtilmektedir [3].

Flor, SF₆ molekülünü oluşturan elemanlardan biridir. Periyodik tablonun yedinci gurubunda yer alan flor, klor gibi ağır gazlar, elektron tutucu özelliklere sahip olmaları nedeniyle, benzer koşullar altında hava, N₂ ve CO₂'e göre daha yüksek delinme dayanımlarına sahiptirler. SF₆ gazının çok pahalı olması nedeniyle, yüksek delinme dayanımına sahip ve daha ucuz olan alternatif gazlar ya da gaz karışımlarının bulunmasına yönelik pek çok çalışma sürmektedir [4].

SF₆'nın yalıtkan olarak kullanıldığı uygulamalar büyük bir hızla artmaktadır. Özellikle, son zamanlarda metal kaplı yüksek gerilim dağıtım istasyonlarında da büyük oranda SF₆ kullanılmaktadır [5]. Uygulamada sıkıştırılmış SF₆ gazının elektriksel delinme dayanımı genellikle, çıkıntı, yüzey pürüzlülüğü ve sistemde var olan iletken parçacıklardan kaynaklanan yerel yüksek elektrik alan şiddetlerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu yüzden, hem yalıtım maliyetini azaltmak hem de istenmeyen parçacıklardan kaynaklanabilecek delinme olasılığını en aza indirmek amacıyla SF₆'nın diğer gazlarla karışımlarının kullanımı, bir seçenek olarak ilgi çekici olmaktadır [6].

SF₆'nın, bir kükürt atomu çevresinde düzenli ve simetrik olarak yerleşmiş altı flor atomundan oluşması, ona kimyasal eylemsizlik ve ısı kararlılık özelliği kazandırmaktadır. Gaz halindeki SF₆, 500°C sıcaklıklara kadar alevlenmez ve ısı olarak kararlıdır. SF₆, bir elektriksel boşalmada yeni moleküler bileşenlere ayrışır. Bu bileşenler, çok hızlı ve öncelikli olarak tekrar SF₆'yı oluşturmaya meyillidir. Bu özellik, SF₆'nın iyi bir ark kesme ortamı olmasında önemli rol oynar [7].

Negatif iyon oluşturan gazlardan SF₆, iyi yalıtım özellikleri ve kararlılığı nedeniyle geniş kullanım alanları bulmuştur. Yüksek gerilim aygıtlarının boyutlarının büyümesi ile birlikte yalıtım amacıyla kullanılan gaz maliyeti önemli ölçüde yükselmektedir. Bu ise araştırmacıları, SF₆ gazı yerine, azot gibi daha ucuz ve çok bulunan gazlarla karışımlarının kullanım olanaklarını araştırmaya yöneltmiştir. Gaz karışımlarından SF₆+N₂ gazı, iyi yalıtım özelliklerine sahip, zehirli olmayan ve alevlenmeyen karışımdır. İyi elektriksel özellikleri yanında yüksek ark söndürme özelliği de göstermesi bu gaz karışımını çekici kılmaktadır [8].

SF₆+N₂ gazında SF₆ yüzdesinin artışı ile büyük bir olasılıkla, SF₆ moleküllerinin foto iyonlaşması ve elektron enerji dağılımının değişmesi nedeni ile iyonlaşmada artış gözlemlendiği belirtilmektedir. Benzer etki, SF₆+hava'da da görülmüştür [9].

Doğru gerilimde, düzgün olmayan alanda, örneğin çubuk-düzlem elektrot sisteminde, SF₆+N₂ karışımlarının yalıtkanlık davranışlarının, saf SF₆'nin-kine çok benzer olduğu görülmektedir. Ancak, çubuk elektrot pozitif olduğunda, SF₆ ve SF₆+N₂ karışımlarının delinme gerilimi-basınç eğrilerinde bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Bu farklılık, karışımlarda, saf SF₆'dakine göre daha

yüksek basınçlarda gözlenmekte ve karışım oranı ile değişmektedir. Çubuk elektrot negatif olduğunda, N_2 'nin delinme dayanımı, küçük oranda SF_6 'nın varlığından dahi etkilenir. Darbe geriliminde ise düzgün olmayan alanda sıkıştırılmış SF_6 'nın delinme dayanımında bir düşüş görülür.

SF_6+N_2 karışımlarının, serbest parçacık ve elektrot yüzey pürüzlülüğüne duyarlılığı, saf SF_6 'ya göre daha azdır. Düzgün olmayan alanda, karışımlarla daha yüksek darbe dayanımları elde edilir. Ayrıca karışımlarda daha düşük kaynama noktalarına inilebilir. N_2 gaz yalıtımlı negatif çubuk-düzlem elektrot sistemine bir miktar SF_6 katıldığında delinme geriliminde hızlı bir yükselme görülmektedir. Örneğin, %5'lik SF_6 ile başlangıçta, saf SF_6 'nın delinme dayanımının %65'ine ulaşılır ve daha sonra doyma görülür.

Söz konusu gazlarda boşalmada, boşalma yolu, N_2 'de doğrusal iken, SF_6 ve karışımlarında eğrisel bir biçim alır. Bu etki, basınç arttıkça büyük bir olasılıkla uzay yükü yoğunluğunun artması ve yayılma hızının küçülmesi nedeni ile büyür. Azotta negatif uzay yükü oluşumu söz konusu olmadığından, boşalma yolu doğrusaldır.

400 kPa(*)'da %5-%85'lik SF_6 karışımlarının delinme gerilimleri, saf SF_6 'ninkine göre yüksektir. Bunun nedeni, korona kararlılığı olabilir. 500 kPa'lık basınçlarda %30'dan daha az SF_6 içeren karışımlardaki delinme gerilimlerinin, saf N_2 'dekinden küçük olduğu saptanmıştır. Benzer durum, darbe gerilimlerinde de gözlenmiştir [10].

Karışımındaki SF_6 oranının arttırılması, karışımın delinme dayanımını çok az miktarda büyütür.

Çubuk elektrot pozitif olduğunda, hem SF_6 'nın hem de SF_6+N_2 karışımlarının delinme gerilimi-basınç eğrisinde bir süreksizlik gözlenir. Süreksizliğin gözlemlendiği basınç, karışımda, saf SF_6 'dakinden daha yüksektir. 200 kPa'a kadar delinme gerilimi, negatif kutbiyettekine benzer biçimde, SF_6 oranından etkilenir. Daha yüksek basınçlarda, karışımın delinme dayanımı, saf SF_6 'dakinden %70'lere varan oranlarda yüksek olabilir [10].

(*) Paskal (Pa) : Basınç birimi

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^5 \text{ dyn}}{10^4 \text{ cm}^2} = 10 \text{ bari}$$

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ bari} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

SF₆ yalıtımlı düzenlerin delinme dayanımları, önlenemeyen, özellikle uzun ve ince yapıdaki iletken parçacıkların varlığı nedeniyle 2 ile 10 kat azalabilir.

SF₆'nın delinme dayanımı, düzgün elektrik alanında, gaz basıncının ya da elektrot açıklığının büyümesi ile bir doyma gösterir. Bu, SF₆'nın yüksek basınç bölgesinde çok yüksek bir delinme dayanımına sahip olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, elektrik alanı düzgün olmadığında ve büyük elektrot açıklıklarında, delinme gerilimi oldukça düşer ve ayrıca negatif kutbiyette bazı basınç bölgelerinde basıncın artması ile delinme gerilimi küçülür [11].

SF₆ mükemmel bir yalıtkan olduğu halde, düzgün olmayan alanlarda darbe karakteristiği çok düşüktür [12].

Gaz yalıtımlı iletim hatlarında iletken-dış gövde arası yüksek basınçlı SF₆ gazı ile doldurulmakta ve böylece yağlı ya da XPLE kablolarına göre çok daha büyük (4-8 kA/hat) akımlar, düşük bağıl dielektrik sabiti ($\epsilon_r=1.0$) sayesinde küçük dielektrik kayıplarla iletilebilmektedir. Öte yandan, gaz yalıtımlı iletim hatlarının bükülgen olmaması, kurulma yöntemlerini oldukça kısıtlamaktadır. Ayrıca, taşıma zorluklarından ötürü birim uzunluklar 12-14 m ile sınırlı olmakta ve çok sayıda ek gerekmektedir. Bu nedenlerle, gaz yalıtımlı iletim hatları daha çok, büyük akımların söz konusu olduğu yerlerde kullanılmaktadır.

500 kV'luk iletim hattının yeni tasarım büyüklükleri (SF₆ gaz basıncı: 0,6 kPa, izin verilebilir iletken sıcaklığı 105°C, yalıtkan dayanımı 5 kV_{etk}/mm), alışılmış büyüklüklere (350 kPa, 90°C, 3 kV_{etk}/mm) göre iyileştirilmiştir. Örneğin, 500 kV, 8 kA'lık gaz yalıtımlı bir düzende iletken çapı/dış gövde çapı boyutları, alışlagelen düzenlerde 230/700 mm iken geliştirilen düzenlerde bu boyutlar 180/480 mm'ye düşürülmüştür [13].

Pürüzlülük etkisini araştırmaya yönelik çalışmalarda kullanılan yapay pürüz boyutlarının, üretim aşamalarında ortaya çıkan pürüz boyutlarından çok büyük olduğu açıktır. Dolayısıyla böyle pürüzler kullanılarak elde edilen sonuçlar uygulamadaki koşullara doğrudan uygulanamaz.

Sıkıştırılmış SF₆ ile yalıtılmış bir yüksek gerilim aygıtının delinme dayanımı, teori ile öngörülene göre oldukça küçüktür. Sıkıştırılmış SF₆'nın delinme dayanımındaki bu azalmanın, elektrot yüzeyindeki mikroskobik

pürüzler ya da iletken parçacıklar tarafından elektrik alanında yaratılan yerel yükselmelerden kaynaklandığı söylenebilir. Elektrik alanındaki bu değişiklikler, E elektrik alan şiddetine bağlı bir büyüklük olan $\bar{\alpha}$ etkin iyonlaşma katsayısını etkileyerek, özellikle $\bar{\alpha}=0$ 'daki $E=E_{\text{lim}}$ değerini ve SF_6 'nın delinme dayanımını büyük ölçüde değiştirebilirler. SF_6 'nın, elektrot yüzey pürüzlülüğüne karşı bu duyarlılığı, yalıtım özellikleri daha iyi olan bir gazın bulunması ümidiyle diğer kuvvetli elektronegatif gazlar ve gaz karışımlarının araştırılmasına yol açmıştır.

Elektrot yüzey pürüzlülüğünün, kuvvetli elektronegatif gazların yalıtım dayanımlarına etkileri üzerine yapılan deneysel araştırmalar, iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir.

- a) Düzlemsel elektrotlar üzerine yerleştirilmiş, geometrik bakımdan tam olarak tanımlanmış yapay pürüzlerin kullanılması,
- b) Yüzeyinde, üretim aşamasında ortaya çıkanlarla karşılaştırılabilecek boyutlarda pürüz bulunan elektrotların kullanılması.

İkinci yaklaşım, normal çalışma durumuna uyduğundan, gazın delinme davranışının incelenmesine ilişkin olarak elde edilen sonuçlar, doğrudan uygulamaya yansıtılabilirler. Ancak bu durumda, kullanılan elektrot yüzeylerinin durumu ile boşalma olayları arasında ilişki kurulması zorlaşır [14].

Uygulamada iletkenler, üretim süreçlerine bağlı olarak pürüzlü yüzeylere sahiptirler. Bu doğal mikroskobik yüzey pürüzlülükleri, elektrik alanında bir bozulmaya yol açarlar. Öyle ki, pürüzlü durumdaki $E_{\text{max,p}}$ maksimum alan şiddeti, pürüzsüz durumdaki E_{max} maksimum alan şiddetinden büyük olur. Pürüzden kaynaklanan alan şiddetindeki bu artış,

$$m = \frac{E_{\text{max,p}}}{E_{\text{max}}} \quad m \geq 1 \quad (1)$$

biçimindeki bir pürüzlülük katsayısı ile tanımlanabilir [15].

Uygulamadaki gaz yalıtımlı sistemler, metalik parçacık kirlenmesinden önemli ölçüde etkilenirler. Bu parçacıklar, montaj aşamasında ortaya çıkabilir ya da normal çalışma sırasındaki titreşimler ve elemanların aşınması gibi nedenlerle oluşabilirler [16].

İletken parçacıkların varlığı, negatif darbede çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrot düzenlerinin delinme karakteristiklerini büyük ölçüde etkilemektedir [17].

Yüksek yalıtım sağlayan SF_6 gazı, kesici gibi yüksek gerilim aygıtlarında, yalıtkan ortam olarak geniş ölçüde kullanılmaktadır. SF_6 yalıtımlı bir aygıtta, ısı, mekanik ve elektriksel karakteristikler bakımından göz önüne alınması gereken pekçok etken vardır.

SF_6 gazının hava, N_2 ve CO_2 gibi daha ucuz gazlarla karışımları, son yıllarda yoğun olarak araştırılmaktadır. Bu tür araştırmaların yapılmasının başlıca iki amacı vardır. Birinci amaç, ekonomik ve teknik açıdan uygun bir yalıtkan geliştirmektir. İkincisi ise, SF_6 diğer sıkıştırılmış gazlar ve bunların karışımlarının işletme koşullarında boşalma olaylarını daha iyi anlayabilmektir.

SF_6 gazının hava, N_2 ve CO_2 ile karışımlarında boşalma olayları, düzgün ve az düzgün alanlarda çokça araştırılmaktadır. Bununla birlikte, böyle karışımların düzgün olmayan alanda darbe delinmesine ilişkin araştırmalar yeterli değildir.

Kuffel ve Yializis, araştırmalarında, $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımının negatif darbe delinme geriliminin, düzgün alandakine benzer biçimde, SF_6 artışı ile arttığını ve N_2 için delinme geriliminin en düşük ve SF_6 içinse en yüksek değerde olduğunu gözlemişlerdir. Buna karşılık, Watanabe ve Takuma, N_2 ya da havaya biraz SF_6 katılmasının delinme gerilimlerinde düşme yarattığını gözlemişlerdir. Ayrıca, N_2 ve havanın delinme gerilimlerinin, saf SF_6 'nunkinden bile yüksek olduğunu belirlemişlerdir [18]. Bu iki çalışmadaki deney koşulları tamamen farklı olduğundan, bu sonuçları birlikte yorumlamak güçtür.

Açıklığı 50 mm olan çubuk-düzlem elektrot sisteminde, 50 kPa'da SF_6 'nın negatif darbe delinme gerilimi, hava, N_2 ya da CO_2 'tekine göre 3 kat kadar daha büyüktür. Bununla birlikte basınç, 500 kPa'a doğru arttırılırken SF_6 'nın delinme gerilimi, hava, N_2 ya da CO_2 'tekine göre yalnızca %10-20 kadar daha yüksektir. Kullanılan elektrot düzeninde söz konusu gazların negatif darbe delinme gerilimleri, pozitif darbe delinme gerilimlerinden daha yüksektir. N_2 gazının negatif darbe delinme geriliminin pozitiftekine oranının, gaz basıncına bağlılığı azdır ve değeri yaklaşık olarak 2'dir. Diğer gazlarda bu oran, basınçla değişir ve basıncın 50 ile 500 kPa arasındaki değerleri için

havada 1-2; CO₂'te 1,2-2,5 ve SF₆'da 1,7-2,1 arasında değişir. En büyük değerler, 400 ile 500 kPa basınç aralığında ölçülürken; en küçük değerler, atmosfer (100 kPa) basıncında ya da bunun da altındaki basınçlarda elde edilir. Buna göre, böyle küçük açıklıklı çubuk-düzlem elektrot sistemlerinin yalıtımında bu gazların tümü için pozitif darbe delinmesi, daha önemli olmaktadır [18].

SF₆, gaz yalıtımlı elektriksel aygıtlarda en çok kullanılan yalıtkan gazlardan biridir. Yüksek delinme dayanımına ek olarak, zehirsiz olması ve kimyasal olarak eylemsizliği, SF₆'yı çekici kılmaktadır. Ancak, SF₆'da bir elektriksel boşalma olduğunda, zehirli ve metalleri aşındırıcı, katı yalıtkan malzemelere karşı aktif olabilen yeni kimyasal maddeler oluşabilir [19].

Bu çalışmada, darbe geriliminde hava, N₂ ve SF₆ gazları ile SF₆+N₂ gaz karışımlarında, düzgün olmayan alanda, pürüzsüz ve pürüzlü elektrot sistemlerinde, elektrot açıklığının, gaz basıncının, gerilim kutbiyetinin ve pürüzün varlığının delinme gerilimlerine etkileri incelenmiştir.

Darbe gerilimi ile çalışmakla, bu gazların yıldırım olaylarından kaynaklanan darbe karakterindeki aşırı gerilimlere karşı davranışını ve bu davranışta aşırı gerilimin kutbiyetinin etkisini görme olanağı elde edilmiştir.

Çalışmada göz önüne alınan ve kullanılan gazlar, yukarıda belirtildiği gibi bu alanda üzerinde ekonomik ve teknik özelliklerini ve elektriksel davranışlarını belirlemeye yönelik araştırmaların yaygın olarak yapıldığı gazlardır. Söz konusu gazların aynı koşullarda davranışlarını gözlemek, karşılaştırmak ve değerlendirmek amaçlanmıştır.

Darbe geriliminde gazların delinmesi üzerine yapılan bu çalışmada düzgün olmayan alan dağılımına sahip elektrot sistemlerinden biri olan küre-düzlem elektrot sistemi göz önüne alınmıştır. Amaç, gazların düzgün olmayan alandaki davranışını gözlemek olduğundan, küre-düzlem elektrot sistemi bu amaç için yeterli görülmüştür.

Uygulamada ortaya çıkan elektrot yüzey pürüzlülüğünün delinme gerilimine etkisi, küre-düzlem elektrot sisteminin düzlem elektrodu üzerinde boyutları, biçimi ve konumu belirli bir pürüzün varlığı ile göz önüne alınmıştır. Çalışmada, pürüzlülüğün etkisinin araştırılması planlandığından

incelemeler, makroskobik boyutlarda yarı küresel iletken tek bir pürüz ile gerçekleştirilmiş ve pürüzün olması ve olmaması durumları değerlendirilmiştir.

Uygulamada gazlar, farklı basınç ve elektrot açıklıklarında kullanılmaktadır. Çalışmada da bu durum göz önüne alınarak basınç ve elektrot açıklığı parametre olarak seçilmiş ve basınç, açık hava basıncı referans alınarak 0 bar ile 4 bar aralığında, elektrot açıklığı ise 5 mm'lik artımlarla 5 mm ile 25 mm aralığında değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, ortam sıcaklığında yapılmıştır.



BÖLÜM 2

DÜZGÜN OLMAYAN ALANDA GAZLARDA BOŞALMA OLAYLARI

2.1. Giriş

Düzgün olmayan alanda gazlarda boşalma olayları konusuna girmeden önce, konu ile ilgili olan kinetik gaz teorisinin temel yasalarına bir göz atmak yararlı olacaktır. Bu nedenle bu bölümün girişinde sırasıyla önce klasik gaz yasalarından, ardından gazlarda akım iletiminden ve sonunda da tamamen delinmeye yol açan iyonlaşma ve çözünme süreçlerinden kısaca söz edilecektir.

2.1.1. Klasik Gaz Yasaları

Elektrik ya da magnetik alanın bulunmadığı bir ortamda, az iyonize olmuş bir gazda elektrik yüklü parçacıklar, moleküller arasındaki çarpışmalara katılırlar. Parçacıkların bu davranışları klasik gaz yasalarına uyar [20].

Temel gaz yasalarından birisi, Boyle - Mariotte tarafından deneysel olarak ortaya konan yasadır. Bu yasaya göre, sabit sıcaklıkta kapalı bir kaptaki bir gazın b-basıncı ile V-hacminin çarpımı sabittir; yani

$$b V = C = \text{sabit} \quad (2.1)$$

dir. Aynı düzende basınç sabit tutulursa, T ve T_0 (°K) mutlak sıcaklıklarındaki V ve V_0 hacimleri arasındaki ilişki,

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (2.2)$$

olur (Gay-Lussac Yasası).

Denklem (2.2)'ye göre, denklem (2.1)'deki C-sabitinin, T_0 sıcaklığındaki V_0 hacmi ile ilişkisi

$$b V_0 = C_0 \quad (2.3)$$

biçimindedir. Denklem (2.2)'den V_0 'ın çekilmesi ile

$$b V = \left(\frac{C_0}{T_0} \right) T \quad (2.4)$$

elde edilir. (C_0/T_0) oranına "genel gaz sabiti" adı verilir ve "R" ile gösterilir. Böylece denklem (2.4),

$$b V = R T = C \quad (2.5)$$

biçimine dönüşür. R, sayısal olarak $8,314 \text{ J}^\circ\text{K.mol}$ değerine eşittir. Gözönüne alınan gazın kütlesinin 1 kilogram moleküle (1 kilomol) eşit olduğu varsayılırsa n-gazın kilomol sayısı olmak üzere, denklem (2.1),

$$b V = n C = n R T \quad (2.6)$$

genel biçimini alır. Denklem (2.6), N_1 adet molekül içeren V hacmindeki N-gaz yoğunluğu cinsinden ifade edilebilir. Avagadro sayısı olarak bilinen $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ molekül/mol hacimdeki değeri için $N = N_A$ alınırsa, denklem (2.6),

$$\frac{N_1}{V} = N = \frac{N_A b}{R T}$$

ya da

$$b = N \frac{R}{N_A} T = N k T \quad (2.7)$$

biçimine dönüşür. $R/N_A = k = 1,3804 \cdot 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$ sabiti, "Boltzmann sabiti" olarak bilinir.

V_1 ve V_2 hacimlerindeki iki gaz, aynı sıcaklık ve basınçta birleştirilirse yeni hacim $V_1 + V_2$ ya da daha genel olarak

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.8)$$

olur. Denklem (2.7) ile (2.8)'in birleştirilmesinden,

$$V = \frac{n_1 RT}{b} + \frac{n_2 RT}{b} + \dots + \frac{n_n RT}{b}$$

ve

$$b = \frac{n_1 RT}{V} + \frac{n_2 RT}{V} + \dots + \frac{n_n RT}{V}$$

ya da

$$b = b_1 + b_2 + \dots + b_n \quad (2.9)$$

elde edilir. İfadedeki $b_1, b_2, \dots, b_n$ değerleri, 1, 2, ..., n gazlarının kısmi basınçlarını göstermektedir. Denklem (2.9), "kısmi basınçlar yasası"nı ifade etmektedir.

Yukarıda verilen denklemler, Maxwell'in "kinetik gaz teorisi"nden doğrudan türetilenlerdir. Örneğin kinetik gaz teorisinin temel denklemi, aşağıdaki varsayımlar altında türetilir [21]:

1. Gazlar, küresel oldukları varsayılan eşit kütleli moleküllerden oluşurlar.
2. Moleküller, sürekli olarak rasgele hareket halindedirler.
3. Çarpışmalar, elastiktir.
4. Moleküller arası ortalama uzaklık, çaplarından çok daha büyüktür.
5. Moleküller ile kap yüzeyleri arasındaki sürtünmeler gözardı edilebilir.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, her bir kenarının uzunluğu $l=1$ m olan bir kap içinde, herbirinin kütlesi m ve karesel ortalama hızı v olan N_1 tane molekül gözönüne alınsın. Hız, $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ biçiminde bileşenlerine ayrılmış olsun. Kütlesi m olan bir molekülün, x doğrultusunda v_x hızı ile hareket ettiği varsayılsın. Molekül, kabın YZ yüzeyine çarptığında, $-v_x$ hızı ile geri döner. Bu durumda momentumundaki değişim,

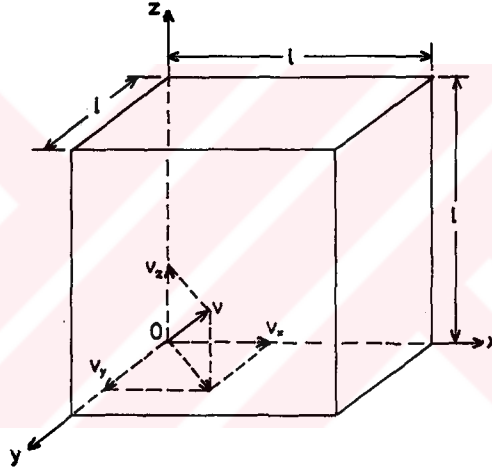
$$\Delta m = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

olur. Kenar uzunluğu l olan bir küpün sağ yüzeyinde saniyedeki çarpışma sayısı,

$$\frac{\Delta m}{s/\text{molekül}} = \frac{2mv_x v_x}{2l} = \frac{mv_x^2}{l}$$

olacaktır. Aynı molekülün, karşı yüzeyde de aynı değişimi göstermesi beklenir. Buna göre x-doğrultusunda, $\Delta m/s/\text{molekül} = 2mv_x^2/l$ 'dir. Buna göre bir küp içinde bir saniyede molekül başına momentumdaki toplam değişim veya parçacık başına kuvvet,

$$F = \frac{2m}{l}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = \frac{2mv^2}{l} \quad (2.10)$$



Şekil 2.1. Moleküler kuvvetin bileşenleri.

olarak bulunur. Bir parçacık için kinetik enerji ifadesi $W = (1/2)mv^2$ olduğuna göre,

$$F = 4 \frac{W}{l}$$

yazılabilir. N_1 tane parçacık için, parçacıkların farklı v hızlarından kaynaklanan enerji, ortalama enerji olur ve

$$F = 4 \frac{N_1 \overline{W}}{l}$$

yazılabilir. Kuvvet, b basıncına yol açar ve kübün toplam alanının $S = 6 l^2$ olduğu gözönüne alınırsa,

$$b = \frac{F}{S} = \frac{4N_1 \bar{W}}{6l^2} = \frac{2}{3} \frac{N_1 \bar{W}}{l^3} \quad (2.11)$$

ve kübün hacimin $l^3 = V$ olduğu gözönüne alınarak,

$$b = \frac{2}{3} \frac{N_1}{V} \bar{W} = \frac{2}{3} N \bar{W} = NkT$$

bulunur. Böylece, molekül başına ortalama enerji için

$$\bar{W} = \frac{3}{2} kT \quad (2.12)$$

elde edilir.

2.1.2. Bir Molekül Kümesinin Hız Dağılımı

Olasılık kavramları kullanılarak, moleküllerin hız dağılımının, gazın sıcaklığına ve molekül ağırlığına bağlı olduğu gösterilebilir. Gaz moleküllerinin ya da parçacıklarının v - hızının istatistiksel bir dağılımı vardır ve bu dağılım

$$f(v) = \frac{dN_v}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{v}{v_p} \right)^2 \left[e^{(-v/v_p)^2} \right] \frac{dv}{v_p} \quad (2.13)$$

biçiminde ifade edilen Boltzmann-Maxwell dağılımına uyar. Bu bağtıda, v_p en muhtemel hız, dN_v/N ise mutlak hızları v/v_p ile $(v+dv)/v_p$ aralığında bulunan parçacıkların bağıl sayısıdır.

$$v_r = \frac{v}{v_p}$$

eşitliği kullanılarak,

$$f(v_r) = \frac{dN_v}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} v_r^2 e^{-v_r^2} \quad (2.14)$$

hız dağılım fonksiyonu elde edilir.

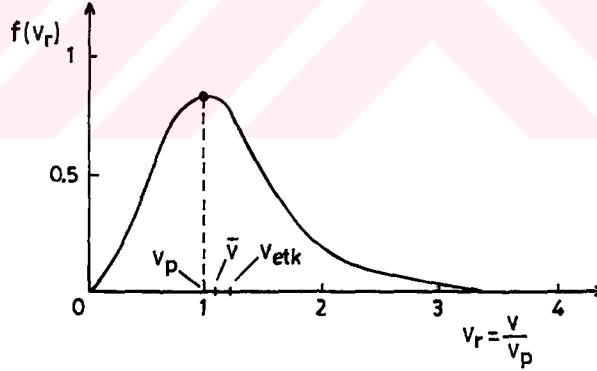
Denklem (2.14)'e ilişkin dağılım fonksiyonu, Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Fonksiyonun, v_p en büyük olasılıklı hızına göre simetrik olmadığına dikkat edilmelidir. Parçacıkların büyük bir kısmının hızı, v_p 'den büyüktür. Ortalama hız $\bar{v}$, v_r 'nin 0'dan sonsuza integrali ile elde edilir. Buna göre,

$$\bar{v}_r = \int_{v_r=0}^{\infty} v_r f(v_r) dv_r = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_{v_r=0}^{\infty} v_r^3 e^{-v_r^2} dv_r = \frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

ya da

$$\bar{v} = \bar{v}_r v_p = 1,128 v_p \quad (2.15)$$

elde edilir.



Şekil 2.2. Hız dağılım fonksiyonunun değişimi (v_p en muhtemel hız, $\bar{v}$ ortalama hız, v_{etk} etkin hız).

Hızın karesel ortalaması ya da etkin değeri, v_r 'nin karesi alınarak karesel ortalama değeri

$$(v_r)_{etk}^2 = \int_{v_r=0}^{\infty} v_r^2 f(v_r) dv_r = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_{v_r=0}^{\infty} v_r^4 e^{-v_r^2} dv_r = \frac{3}{2}$$

olarak bulunur [20-22]. Böylece,

$$v_{\text{etk}} = v_{r \text{ etk}} \cdot v_p = \sqrt{\frac{3}{2}} v_p = 1,224 v_p \quad (2.16)$$

elde edilir. Denklem (2.12) ile verilen, bir parçacığın ortalama kinetik enerji ifadesi, parçacığın etkin hızını, sıcaklığına ilintiler $\left[(1/2)mv_{\text{etk}}^2 = (3/2)kT \right]$ ve buradan

$$v_{\text{etk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} ; \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{m\pi}} ; \quad v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (2.17)$$

elde edilir. Hızlara ilişkin oranlar sırasıyla $v_p : \bar{v} : v_{\text{etk}} = 1 : 1,128 : 1,224$ olur.

Yukarıda ele alınan kavramlar yalnızca, molekül ve parçacıklar ısı dengede kaldığında ve parçacıkları etkileyebilecek herhangi bir dış alanın bulunmaması durumunda geçerlidir. Gaz, aynı sıcaklıkta olmak üzere elektron, iyon ya da atom içeriyorsa, böyle bir karışımın ortalama parçacık enerjisi, m , m_i ve m_e sırasıyla molekül, iyon ve elektronların kütleleri ve v_{etk} , $v_{i \text{ etk}}$ ve $v_{e \text{ etk}}$ hızları olmak üzere

$$\frac{1}{2}mv_{\text{etk}}^2 = \frac{1}{2}m_e v_{e \text{ etk}}^2 = \frac{1}{2}m_i v_{i \text{ etk}}^2 = \dots = \frac{3}{2}kT \quad (2.18)$$

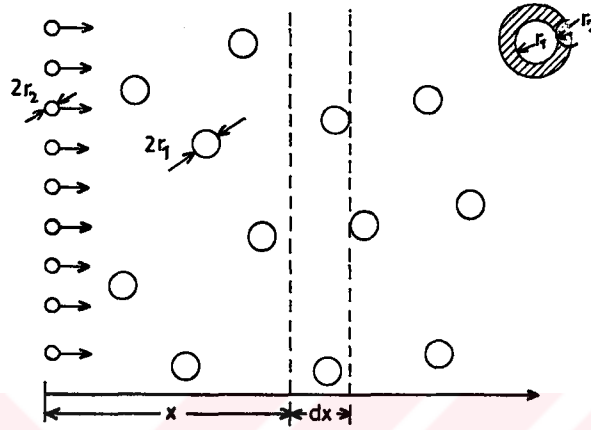
yazılabilir.

2.1.3. Molekül ve Elektronların Serbest Yolu

Serbest yolun (λ) parametrelerinin ve dağılımlarının bilinmesi, basit bir "balistik" model varsayımı ile $\alpha=f(E/N)$ ilişkisini açıklayabilir. Bu amaçla serbest yolun kısa bir açıklaması verilecektir. Serbest yol (λ), molekül ya da parçacıkların iki çarpışma arasında katettikleri uzaklık (yol) olarak tanımlanabilir. Serbest yol, rasgele bir büyüklüktür ve gösterileceği gibi ortalama değeri, parçacık ya da molekül yoğunluğuna bağlıdır.

Ortalama serbest yol ($\bar{\lambda}$) ifadesini elde etmek için, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi r_1 - yarıçaplı durağan bir molekül kümesi ve hareket eden r_2 - yarıçaplı daha küçük parçacıkların varlığı gözönüne alınsın. Küçük parçacıklar hareket ettikleri için, gaz molekülleri ile çarpışmaları sonucu yoğunlukları azalır.

Gerek hareket eden parçacıkların gerekse moleküllerin birer dolu küre gibi davrandığı varsayılırsa çarpışma, her zaman r_1+r_2 uzaklığındaki iki parçacığın merkezinde oluşur. Bir molekülce belirlenen çarpışma alanı, $\pi(r_1+r_2)^2$ ve birim hacimde de N molekül yoğunluğu olmak üzere, $N\pi(r_1+r_2)^2$ olur ve genellikle "çarpışma etkin alanı" olarak tanımlanır.



Şekil 2.3. Serbest yol hesabına ilişkin model.

Orijinden x uzaklığında bulunan dx kalınlığındaki bir tabaka ve x uzaklığında çarpışma yapmamış parçacık sayısının $n(x)$ olduğu varsayılırsa dx tabakasında çarpışmalar sonucu hareketli parçacıklardaki azalma

$$dn = -n(x)N\pi (r_1 + r_2)^2 dx$$

olur. $x=0$ 'daki parçacık sayısının n_0 olduğu varsayılırsa, integrale

$$n(x) = n_0 e^{-N\pi (r_1 + r_2)^2 x} \quad (2.19)$$

bulunur. Ortalama serbest yol ($\bar{\lambda} = \bar{x}$) aşağıdaki gibi elde edilir. Denklem (2.19)'un türetilmesi ile

$$f(x) = \frac{dn}{n_0} = N\pi (r_1 + r_2)^2 e^{-N\pi (r_1 + r_2)^2 x} dx$$

elde edilir. Ortalama serbest yol için

$$\bar{x} = \bar{\lambda} = \int_{x=0}^{\infty} xf(x)dx = \frac{1}{N\pi (r_1 + r_2)^2} \quad (2.20)$$

Denklem (2.20)'nin paydasındaki $\pi(r_1+r_2)^2$ alan boyutundadır ve genellikle "çarpışma kesiti" olarak tanımlanır ve σ ile gösterilir. Buna göre,

$$\sigma = \frac{1}{N\lambda} \quad (2.21)$$

olur.

Denklem (2.21)'e, Q , N molekül/hacim yoğunluğundaki gazın birim hacminde tüm çarpışmalar için molekül ve parçacıkların gösterdiği etkin kesit olmak üzere, $Q=N\cdot\sigma$ yerleştirilebilir. Örneğin hareket eden parçacıklarla gaz parçacıklarının yalnızca p_i kesri iyonlaşmaya neden olursa, p_i iyonlaşma olasılığı olur. Böylece yalnızca iyonlaşma ile sonuçlanan çarpışmalar sayılırsa moleküller, yalnızca $p_i Q = Q_i$ etkin alanını gösterirler. Yani Q_i etkin kesittir. Benzer biçimde, uyarılma (Q_u), fotoiyonizasyon (Q_f), tutulma (Q_t) gibi süreçler için elastik çarpışmaları içermek üzere,

$$Q = Q_{\text{elastik}} + Q_i + Q_u + Q_t + \dots \quad (2.22)$$

yazılabilir. Çarpışma kesiti σ , farklı süreçler için geniş bir aralıkta değişir. Örneğin, iyonlaşma için $2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 'ye erişebilirken, nükleer etkileşimlerde 10^{-24} cm^2 ya da daha küçük olabilir.

Denklem (2.20)'nin türetilmesinde çarpışan moleküllerin durağan olduğu, yani (2) no'lu gaz moleküllerinin ısı hızlarının olmadığı varsayılmıştır. Gerçekte ise bu doğru değildir. m_1 ve m_2 gaz bileşenlerinin kütleleri olmak üzere, çarpışma kesidini veren ifadenin

$$\eta = \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}$$

ile çarpılması gerekir. Bir gaz karışımında, 1 tipi (m_1, r_1, N_1) gaz parçacıklarının çarpışma kesiti, gazdaki diğer ($m_2, r_2, N_2, \dots, m_n, r_n, N_n, \dots$) parçacıklarının çarpışma kesitleri toplamına eşit olur. Böylece 1 tipi parçacıkların ortalama serbest yolu,

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{\pi \sum_{i=1}^n N_i (r_1 + r_i)^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_i}}} \quad (2.23)$$

olur. Gazdaki özdeş bir atom için $r_1 = r_2 = r$; $v_1 = v_2$ 'dir. Bu durumda

$$\bar{\lambda}_a = \frac{1}{4 \sqrt{2} \pi r^2 N} \quad (2.24)$$

olur. Gazdaki elektronlar için $r_1 \ll r_2$ ve $m_1 \ll m_2$ olduğundan denklem (2.23),

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{\pi r_2^2 N}$$

ya da

$$\bar{\lambda}_e = 4\sqrt{2} \bar{\lambda}_a = 5,66 \bar{\lambda}_a \quad (2.25)$$

biçimini alır.

Denklem (2.7)'den görüldüğü gibi ortalama serbest yol, sıcaklıkla doğru, gaz basıncıyla ters orantılıdır. Buna göre, $N = b/kT$ eşitliği göz önüne alınarak ortalama serbest yol için,

$$\bar{\lambda}(b, T) = \bar{\lambda}_0 \frac{b}{b_0} \frac{T}{T_0} \quad (2.26)$$

yazılabilir.

2.1.4. Serbest Yol Dağılımı

Moleküler çarpışmaların rasgele olaylar olmaları nedeniyle serbest yolun da rasgele bir büyüklük olduğu ve ortalama bir değer çevresinde dağıldığı söylenebilir. Şekil 2.3'te verilen sistem için ortalama serbest yol, denklem (2.20) ile verilmiştir. Bu ifade, N gaz yoğunluğu, r_1 , r_2 iki tip parçacığın yarıçapları olmak üzere,

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2}$$

biçiminde bulunmuştu.

Serbest yolların dağılım fonksiyonları denklem (2.19)'dan elde edilmiştir. $n(x)$, x uzaklığını çarpışma yapmaksızın kateden molekül sayısı; dn , dx uzaklığında çarpışan molekül sayısı; n_0 , çarpışma yapmamış toplam molekül sayısı olmak üzere,

$$\int_{n_0}^n dn = - \int_{x=0}^{\infty} \ln \frac{dx}{x}$$

ya da

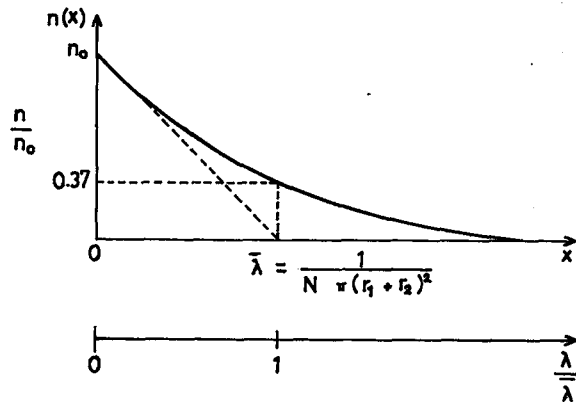
$$n(x) = n_0 e^{-x/\bar{\lambda}} \quad (2.27)$$

biçiminde ifade edilebilir. Denklem (2.27)'ye ilişkin grafik, Şekil 2.4'te verilmiştir.

$\lambda = \bar{\lambda}$ 'da çarpışan molekül yüzdesinin yalnızca %37 olduğu görülmektedir [23]. Denklem (2.27)'deki üstel terim, denklem (2.21)'le tanımlı çarpışma kesitleri cinsinden (x yolu boyunca parçacıkların yutulma ya da çözünmesini göstermek üzere),

$$n(x) = n_0 e^{-N\sigma x} \quad (2.28)$$

biçiminde de yazılabilir. σ , fotoyutulma, yakalanma gibi terimleri içerebilir.

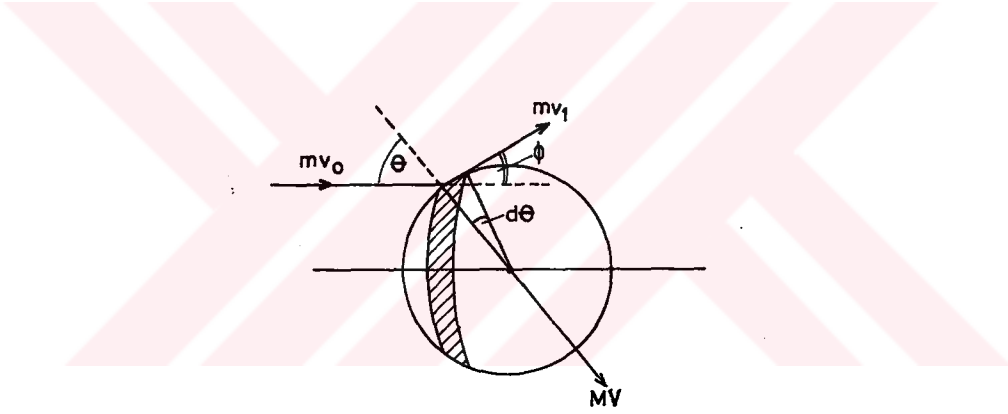


Şekil 2.4. Serbest yol dağılımı.

2.1.5. Çarpışmada Enerji Aktarımı

Gaz parçacıkları arasındaki çarpışmalar, enerji alışverişinin her zaman kinetik olduğu elastik diğer bir deyişle basit mekanik; ya da çarpışan parçacıkların bir kısım enerjisinin, çarpan parçacığın potansiyel enerjisine dönüştüğü elastik olmayan çarpışmalar, biçiminde başlıca iki gruba ayrılabilir.

Çarpışan iki parçacık arasındaki enerji aktarımına ilişkin bir ifade elde etmek üzere, kütleleri m ve M olan iki parçacık arasında elastik çarpışma ele alınmış olsun. Çarpışmadan önce büyük kütleli M parçacığının durgun, küçük kütleli m parçacığının ise Şekil 2.5'te gösterilen doğrultuda bir v_0 hızına sahip olduğu varsayalım. Çarpışmadan sonra parçacıklara ilişkin hızlar, ikincisinin doğrultusu şekilde gösterildiği gibi merkezden geçen doğru boyunca olmak üzere v_1 ve V olsun. θ geliş açısı, ϕ ise saçılma açısıdır.



Şekil 2.5. Elastik çarpışmada enerji aktarımı.

Gelen parçacığın θ açısındaki çarpışmada kaybettiği enerji miktarı için

$$\Delta(\theta) = \left(\frac{v_0^2 - v_1^2}{v_0^2} \right) \quad (2.29)$$

yazılabilir. Çarpışmanın kinetik olduğu varsayıldığından, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri,

$$mv_0 - mv_1 \cos \phi = MV \cos \theta \quad (2.30)$$

$$mv_1 \sin \phi = MV \sin \theta \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}MV^2 \quad (2.32)$$

biçiminde yazılabilir. Denklem (2.30) ve (2.31)'in karelerinin alınarak toplanması ve denklem (2.32) ile birleştirilmesi sonucunda

$$V = \frac{2mv_0 \cos \theta}{M + m}$$

elde edilir. Denklem (2.32)'nin düzenlenip, denklem (2.29)'la birleştirilmesi ile

$$\Delta(\theta) = \frac{MV^2}{mv_0^2} = \frac{4mM \cos^2 \theta}{(m + M)^2} \quad (2.33)$$

bulunur. Çarpışma başına ortalama enerji kaybını bulmak üzere, $P(\theta)$, θ ve $\theta + d\theta$ aralığındaki bir geliş açısında bir çarpışma olması olasılığı olsun. Çarpışma için toplam kesit, $\pi(r_1 + r_2)^2$ 'dir. θ ve $\theta + d\theta$ aralığında bir çarpışmanın olma olasılığı, şekil 2.5'te taralı alanın tüm alana oranı ya da

$$P(\theta)d\theta = \left\{ \frac{2\pi (r_1 + r_2)^2 \sin \theta \cos \theta d\theta}{\pi (r_1 + r_2)^2} = \sin \theta d\theta \right\} \begin{cases} 0 \leq \theta \\ \pi/2 \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

biçiminde verilebilir. Tüm açılarda oluşan çarpışmalara ilişkin ortama enerji kaybı,

$$\overline{\Delta(\theta)} = \int_0^{\pi/2} P(\theta)\Delta(\theta)d\theta / \int_0^{\pi/2} P(\theta)d\theta \quad (2.34)$$

olur. Denklem (2.33) ve (2.34) kullanılarak,

$$\overline{\Delta(\theta)} = \frac{2mM}{(m + M)^2} \quad (2.35)$$

elde edilir.

Hareketli parçacık olarak, çarpılan ile aynı kütleli bir iyon alınacak olursa, $m = M$ olur ve denklem (2.35), her bir elastik çarpışmada büyük oranda

enerji kaybı gösteren $\overline{\Delta(\theta)} = 1/2$ biçimine dönüşür. Öte yandan, gelen parçacık bir elektron ise, $m \ll M$ olur ve denklem (2.35), $\overline{\Delta(\theta)} = 2m/M$ biçimini alır. Bu nedenle bir elektronun yaptığı elastik çarpışmada oransal olarak kaybettiği ortalama enerji, oldukça küçüktür. Örneğin, elektronların, He gaz atomları ile çarpıştığı gözönüne alınırsa, çarpışma başına oransal olarak kaybolan ortalama enerji, $\overline{\Delta(\theta)} = 2,7 \cdot 10^{-4}$ ve argonda ise bu oran $\overline{\Delta(\theta)} = 2,7 \cdot 10^{-5}$ 'dir. Buna göre, elastik çarpışmada iyonlar enerji kaybederken, elektronlar hemen hiç kaybetmezler.

Gelen parçacığın kinetik enerjisinin, çarpılan parçacığın potansiyel enerjisine dönüştüğü durum gözönüne alınmış olsun. Enerji ve momentumun korunumu yasalarının uygulanması ile, W_p başlangıçta durgun olan M kütleli parçacığın potansiyel enerjisindeki artış olmak üzere,

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}MV^2 + W_p \quad (2.36)$$

$$mv_0 = mv_1 + MV \quad (2.37)$$

olur. Denklem (2.37)'nin, (2.36)'ya yerleştirilip düzenlenmesi ile

$$W_p = \frac{1}{2} \left[m(v_0^2 - v_1^2) - \frac{m^2}{M}(v_0 - v_1)^2 \right] \quad (2.38)$$

elde edilir. Gelen parçacıkların sabit kinetik enerjili olmaları koşulu altında denklem (2.38)'in, v_1 'e göre türetilmesi ile

$$\frac{dW_{p \max}}{dv_1} = 0$$

ya da

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{m}{m+M} \quad (2.39)$$

elde edilir. Denklem (2.37), gelen parçacıktan kazanılan enerjinin, parçacığın son ve ilk hızları oranı, kütlelerinin parçacıkların kütleleri toplamına oranına eşit olduğunda maksimum değerine ulaştığını gösterir.

Çarpışan parçacıklar özdeş olduğunda, potansiyel enerjiden kinetik enerjiye maksimum aktarım, $v_1 = v_0/2$ olduğunda ortaya çıkar. Öte yandan, çarpışan parçacık $m \ll M$ kütleli bir elektron ise maksimum enerji aktarımı, çarpışmadan sonraki v_1 hızının, ilk hızın çok küçük bir kesri; yani, $v_1 = (m/M)v_0$ olmasını gerektirir.

Hedef parçacık başlangıçta durgunken, kazanılan maksimum enerjinin ifadesi, denklem (2.39)'daki v_1 hızının, denklem (2.38)'e yerleştirilmesi ile elde edilebilir. Bu durumda,

$$W_{pmax} = \frac{M}{m+M} \frac{mv_0^2}{2} \quad (2.40)$$

bulunur. $m \ll M$ kütleli bir elektron için denklem (2.40),

$$W_{pmax} \cong \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (2.41)$$

biçimini alır. Diğer bir deyişle, kinetik enerjisinin tamamı potansiyel enerjiye dönüşür. Daha sonra görüleceği gibi, iyonların tersine; elektronlar, iyi gaz iyonlaştırıcısıdır. İyonlaşmaya yol açabilmesi için, U_i atom ya da molekülün iyonlaşma potansiyeli olmak üzere, elektronun en azından,

$$\frac{1}{2}mv_0^2 \geq eU_i$$

kinetik enerjisine sahip olması gerekir.

2.2. İyonizasyon Türleri

Elektrotlar, özellikle katot, bir boşalmanın başlaması, sürmesi ve tamamlanmasında, elektron sağlayarak çok önemli bir rol oynar. Normal koşullar altında elektronlar, elektrottan ya da gaz içindeki atom, molekül ya da iyonlardan, elektron ile bunlar arasındaki elektro-statik bağların koparılması ile sağlanır. Bu bağların koparılmasında etkin olan başlıca süreçler, foto iyonizasyon, çarpma suretiyle iyonizasyon, termik iyonizasyon ve yüzeysel iyonizasyondur.

2.2.1. Foto İyonizasyon

Katot yüzeyine gelen ve enerjileri, çıkış ışından büyük ($h\nu > W_i$) olan fotonlar, katot yüzeyinden elektrot koparabilirler. Pek çok metal için ν_0 kritik frekansı, ultraviyole bölgesindedir. Foton enerjisi, çıkış ışından büyük olduğunda, enerji fazlalığı, m elektron kütlesi, v_e elektron hızı, $h\nu_0$ kritik elektron koparma enerjisi ve $h\nu_0 = W_i$ çıkış ışını olmak üzere,

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = h\nu - h\nu_0 \quad (2.42)$$

Einstein ilişkisine göre, elektronun kinetik enerjisine dönüşebilir.

Çıkış enerjisi, element saflığına duyarlı olduğundan, özellikle alüminyum ve kolaylıkla oksitlenen metaller için, çıkış enerjisi bandı biçiminde verilir.

2.2.2. Çarpma Sureti ile İyonizasyon

Elektronlar, metal yüzeyinden pozitif iyon ya da yarı kararlı atom çarpması ile de çıkarılabilirler. Bir elektronun ikincil ışınmasına yol açabilmesi için çarpan iyonun, birisi iyon yükünü nötrleştirmede kullanılmak üzere iki elektron ayırması gerekir. Bir pozitif iyonun, çarpma yoluyla elektron çıkarabilmesi için enerjisinin, çıkış enerjisinin en az iki katı olması gerekir. Pozitif iyonla elektron çıkarılması, Townsend boşalma mekanizmasında başlıca ikincil süreçtir. Uyarılmış nötr atom ya da moleküllerin elektrot yüzeyine gelmesi de yüzeyden elektron çıkarılmasına yol açabilir.

2.2.3. Termik İyonizasyon

Oda sıcaklığında, metallerdeki iletim elektronlarının, yüzeyden ayrılmalarına yetecek kadar ısı enerjileri yoktur. Elektronların, oda sıcaklığındaki ortalama ısı enerjileri,

$$\frac{mv_e^2}{2} = \frac{3kT}{2} = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ eV}^{(*)}$$

kadar olup, metallerin çıkış enerjilerinden çok küçüktür. Bununla birlikte

(*) $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws (J)}$

metal sıcaklığı 1500-2500⁰K gibi bir değere çıkarılırsa, elektronlar, yüzey direncini aşıp metalden ayrılmalarına yetecek kadar enerjiyi ısıl kafes titreşimlerinden alırlar. Işıma akımının elektron kaynağının (katot) sıcaklığı ile ilişkisi, e ve m elektronun sırasıyla yük ve kütlesi, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve W_i yüzeysel çıkış enerjisi olmak üzere,

$$J = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} T^2 e^{(-W_i/kT)} \quad \text{A/m}^2 \quad (2.43)$$

biçiminde verilebilir. Yukarıdaki ifade,

$$A = \frac{4\pi m e k^2}{h^3}$$

eşitliği kullanılarak, çıkış enerjisi azalıp sıcaklık artarken doyma akımının arttığını gösteren,

$$J = AT^2 e^{(-W_i/kT)} \quad (2.44)$$

biçimine dönüşür. m , e , k ve h sabitlerinin yerine konması ile $A = 120.10^{-4} \text{ A.m}^{-2} \cdot (^{\circ}\text{K})^{-2}$ olur. Deneysel olarak bulunan değerler, denklem (2.44) ile öngörülenlerden daha küçüktür. Bu farklılık, elektronların dalga yapısına bağlanmıştır [21]. Işıma ile çıkan elektronlardan bazıları, yeterli enerjiye sahip olabildikleri halde; yüzey atomları ya da yüzeysel kirler tarafından elektrot içerisine yansıtılabilirler. Bu etki, akım yoğunluğu ifadesinde (2.44), R yansıtma katsayısı olmak üzere $A_{\text{etk}} = A(1-R)$ etkin değeri yerleştirilerek hesaba katılabilir.

2.2.4. Yüzeysel İyonizasyon

Elektronlar, büyük alan şiddeti etkisi ile de metal yüzeyinden koparılabilirler. Bir metalin yüzeyindeki kuvvetli alan şiddeti, metal yüzeyindeki eşik potansiyelini bir miktar düşürebilir. Mikro-amperler düzeyinde bir ısıma akımı için gerekli alan şiddeti, 10^7 - 10^8 V/cm düzeyindedir [21,22]. Alan dağılımı düzgün olmayan elektrot sistemlerinde bu düzeydeki alan şiddetlerine oldukça küçük gerilimlerle ulaşılabilir.

İyonizasyon akımı için bir ifade türetmek üzere, şekil 2.6'da gösterildiği gibi yüzeyi terkederek, x doğrultusunda hareket eden bir elektron ele alınmış olsun. Elektronun oluşturduğu elektrik alan, bir noktasal yük ve düzlemsel bir yüzey arasındaki alan biçiminde düşünülebilir. Bu durumda alan, eşpotansiyel yüzeye göre simetrik ve $-x$ konumunda $+q$ değerinde bir görüntü yükünün bulunması durumundaki ile özdeştir. Elektronu x doğrultusunda etki eden kuvvet için,

$$F(x) = -\frac{q^2}{4x^2}$$

bağıntısı elde edilebilir. Buna göre, x uzaklığındaki bir elektronun potansiyel enerjisi,

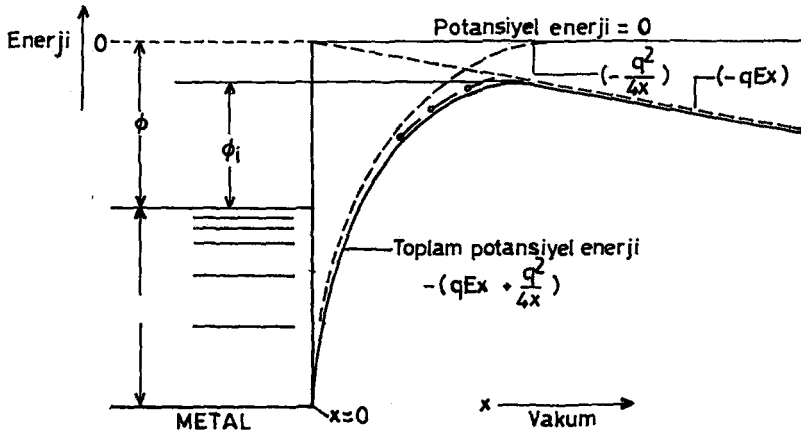
$$W_{el} = -\frac{q^2}{4x} \quad (2.45)$$

olur. Elektronun, dış alan şiddeti etkisiyle kazandığı potansiyel enerji ise

$$W_E = -qEx \quad (2.46)$$

biçiminde ifade edilebilir. Buna göre toplam enerji,

$$W = W_{el} + W_E = -\frac{q^2}{4x} - qEx \quad (2.47)$$



Şekil 2.6. Elektrik alan etkisiyle potansiyel duvarının alçalması.

olur. Böylece, eşik potansiyelinde önemli bir azalma olduğu görülür. Eşik potansiyelindeki en büyük azalmayı bulmak üzere denklem (2.47)'nin türevi alınır,

$$\frac{dW}{dx} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x_m^2} - qE = 0$$

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_0 E}}$$

elde edilir. Bu değerin denklem (2.47)'ye taşınması ile, çıkış enerjisindeki azalma miktarına ilişkin olarak

$$\Delta W = -q\sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2.48)$$

ifadesi bulunur. Böylece, çıkış enerjisinin etkin değeri,

$$W_{\text{etk}} = W_i - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2.49)$$

ve E alanının etkisi altında elektron iyonlaşmasına bağlı akımın ifadesi için, denklem (2.44) kullanılarak,

$$J = AT^2 e^{\left(-\frac{q}{kT} \left(W_i - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} \right) \right)} \quad (2.50)$$

Schottky denklemi olarak bilinen ifade elde edilir. Dış alanın yokluğunda akım ifadesi, termik iyonizasyonda olduğu gibi, J_0 biçiminde (denklem (2.43)) ise, denklem (2.49)'un düzenlenmesi ile

$$J = J_0 e^{\left(\frac{q}{kT} \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} \right)} = J_0 e^{\left(\frac{B\sqrt{E}}{T} \right)} \quad (2.51)$$

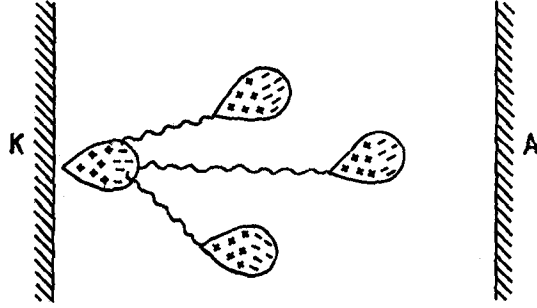
elde edilir. J_0 'dan daha büyük termik iyonizasyon akımlarının elde edilebilmesi için, E alan şiddetinin, 10 MV/cm ya da daha büyük olması gerekir. Ancak uygulamada, daha küçük alan şiddetlerinde de önemsenebilecek iyonlaşma akımları gözlenebilmektedir.

üzerinde yarattığı etki %5 kadar olmaktadır. Yaklaşık %1'lik değişim, tüm elektrot açıklığı boyunca etkili olursa, çığ büyüklüğünü iki katına çıkarabilmekle birlikte; alan değişimi hemen hemen yalnızca çığ başında belirgin olduğundan, etkisi önemsizdir. Bununla birlikte, çığdaki yük taşıyıcılarının sayısı, $n \approx 10^8$ değerine ulaşırca uzay yüklerinin alanı, uygulanan alan değerlerine erişeceğinden, bir kanal oluşumunu başlatabilir. Uzay yükü alanlarının, düzgün olmayan alanlarda korona ve delinme olaylarında önemli etkileri vardır [21].

Çığ gelişimi üzerine sis odalarında yapılan incelemeler, belirli koşullar altında bir çığda ortaya çıkan uzay yüklerinin, çığı hızlı delinmeye yol açan ve kanal olarak bilinen iyonlaşma kanalcıklarına dönüştürebileceğini göstermiştir [21,22]. Önboşalma akımlarının ve minimum delinme dayanımının ölçümlerinden, çığdan kanala geçişin, genel olarak çığ başındaki yükün, x_{kr} alan doğrultusunda çığın kritik uzunluğu olmak üzere, $n_0 e^{\alpha x_{kr}} \approx 10^8$ ya da $\alpha x_{kr} \approx 18-20$ kritik değerine ulaştığında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Kritik çığ uzunluğu, elektrot açıklığından büyükse ($x_{kr} > a$), kanal başlangıcı söz konusu değildir. Sis odasında yaptığı deneylerin sonuçları, Raether'ı iki tür kanal gelişimi öngörmeye yöneltmiştir: 1. İyonlaşma ve çığ başının gelişimini tanımlayan "anot kanalı" ve 2. çığ kuyruğundan ek boşalma gelişimini tanımlayan "katot kanalı".

Boşalma gelişimi gözlemlerinde kısa sürelerin elde edilmesi, Raether, Meek ve Loeb'i birbirlerinden bağımsız olarak, elektrot yapısı ile ilgisi olmayan ve gaz moleküllerinin foto iyonizasyonundan kaynaklanan ikincil süreçte delinmede "kanal" teorisini geliştirmeye yöneltmiştir [21,24].

Raether ve Meek tarafından geliştirilen modellerde çığ, elektrotlar arasında belirli bir kritik değere ulaştığında, uzay yükü alanı ile dışarıdan uygulanan alanın her ikisi birlikte, çığ başının önünde yoğun bir iyonlaşmaya ve gaz parçacıklarının uyarılmasına yol açar. Pozitif iyonlarla elektronlar arasındaki hızlı yeniden birleşmeler, foto-iyonlaşma süreçleri ile ikincil elektronları üretecek olan fotonların çıkmasına yol açarlar. Bu elektronlar, elektrot açıklığındaki elektrik alanı etkisinde, şekil 2.8'de gösterildiği gibi ikincil çıgların oluşumuna yol açar. Fotonlar ışık hızı ile hareket ettiklerinden süreç, elektrotlar arasında hızla iletken bir kanalın gelişmesine neden olur [24].

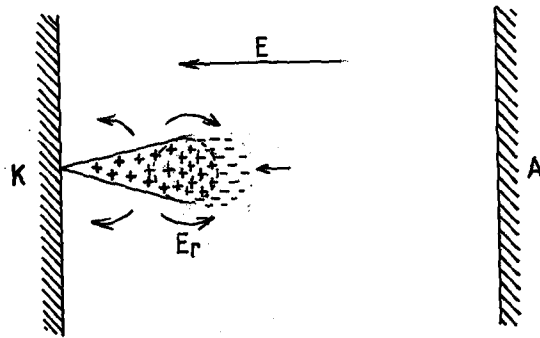


Şekil 2.8. İkincil çığ oluşumu.

Raether, deneysel gözlemlerine dayanarak, bazı basit varsayımlarla E_r , şekil 2.9'da gösterildiği gibi çığ başına doğru yönelmiş ve uzay yükleri tarafından yaratılan alan şiddeti, E dışarıdan uygulanan alan ve böylece çığ başındaki alan $E+E_r$, çığ başının hemen arkasında pozitif iyonlar bölgesindeki alan $E-E_r$ olmak üzere, kanal delinme kriteri için

$$\alpha x_{kr} = 17,7 + \ln x_{kr} + \ln \frac{E_r}{E} \quad (2.52)$$

biçiminde ampirik bir ifade geliştirmiştir [21].



Şekil 2.9. Çığ başında uzay yükü alanı.

Çığdan kanala geçiş koşulunun, E_r uzay yükü alan şiddetinin dışarıdan uygulanan alan şiddetine yaklaşması ($E \approx E_r$) olduğu varsayılır. Buna göre denklem (2.52)'deki delinme kriteri,

$$\alpha x_{kr} = 17,7 + \ln x_{kr} \quad (2.53)$$

biçimini alır. Düzgün alanda kanal teorisinde minimum delinme gerilimi, çığdan kanala geçişin, çığın, a elektrot açıklığını katetmesi durumunda olduğu varsayımına dayanılarak elde edilir. Bu durumda Raether 'ın ampirik ifadesi,

$$\alpha a = 17,7 + \ln a \quad (2.54)$$

biçimine dönüşür. Bu nedenle, kanal teorisine göre delinme, yalnızca kritik uzunluk $x_{kr} \geq a$ olduğunda sözkonusu olur. Kanal delinmesinde, $x_{kr} = a$ koşulu en küçük α değerini verir.

Çığdan kanala geçiş için benzer bir denklem, Meek tarafından da geliştirilmiştir. Raether'da olduğu gibi, geçişin, elektron çığındaki pozitif uzay yüklerinin yarattığı radyal alan, dışarıdan uygulanan alan derecesine ulaştığında görüldüğü varsayılır. Meek, çığ başının hemen gerisindeki pozitif iyonlar tarafından oluşturulan radyal alanın, x cm cinsinden çığ tarafından katedilen uzaklık, b mmHg cinsinden gaz basıncı ve α uygulanan E elektrik alanına karşı düşen elektronun Townsend iyonlaştırma katsayısı olmak üzere,

$$E_r = 5,3 \cdot 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\left(\frac{x}{b}\right)^{1/2}} \text{ V/cm} \quad (2.54)$$

ifadesi ile hesaplanabileceğini göstermiştir [24-26]. Raether modelinde olduğu gibi, minimum delinme geriliminin, çığın a elektrot açıklığını katetmesi ve E_r uzay yükü alan şiddetinin, dışarıdan uygulanan alan şiddetine yaklaşması koşuluna karşı düştüğünü varsayar. $E_r = E$ ve $x = a$ değerlerinin denklem (2.54)'te kullanılarak yeniden düzenlenmesi ile

$$\alpha a + \ln \frac{\alpha}{b} = 14,5 + \ln \frac{E}{b} + \frac{1}{2} \ln \frac{a}{b} \quad (2.55)$$

elde edilir.

Townsend teorisine göre boşalma koşulu, $\alpha \cdot a$ çarpımının 8-10 değerine ($\alpha a = \ln(1/\gamma + 1) = 8 - 10$) ulaşması durumunda sağlanır [25]. Kanal teorisine göre ise delinme oluşumu için $\alpha \cdot a$ çarpımının 18-20 arasında olması gerekir ($\bar{\alpha} a = (\bar{\alpha} x_{kr}) = \ln 10^8 \approx 20$). Bu yüzden belirli deneysel koşullar altında, Townsend teorisinden kanal teorisine geçiş sözkonusu olur. Bu geçiş, basınç

ve elektrot açıklığının büyümesi ile ve uygulamada da $b.a \geq 1-2$ bar.cm bölgesinde görülür. Gazda foto-iyonlaşmaya dayanan kanal teorisinde gelişme süresi, ikincil süreci katoda bağlı olan ve pozitif iyonların geçiş süresinden etkilenen Townsend teorisindekinden çok daha kısadır.

2.4. Düzgün Olmayan Alanda Delinme

Sivri uç-düzlem, küre-düzlem ya da eş eksenli silindir gibi alan dağılımı düzgün olmayan elektrotlarda alan şiddeti ve dolayısıyla $\bar{\alpha}$ etkin iyonlaşma katsayısı, elektrot açıklığı boyunca değişir. Elektron çoğalması, $\bar{\alpha}$ 'nın yol boyunca, $\int \bar{\alpha} dx$ integralinin alınması ile belirlenir. Düşük basınçlarda, delinme için Townsend teorisi, a elektrot açıklığı olmak üzere,

$$\gamma \left[e^{\int_0^a \bar{\alpha} dx} - 1 \right] = 1 \quad (2.56)$$

biçimini alır. Alan şiddeti, belirli bir E_{kr} değerinin altına düştüğünde $\int \bar{\alpha} dx$ integrali geçerliliğini yitirir. Bu durumda, özellikle katottaki alan şiddeti küçük olduğunda olay, yalnızca γ etkisine dayandığından Townsend teorisi de geçerliliğini yitirir.

Genel olarak boşalma başlangıcı ya da delinme için ölçüt, N_{kr} kanalı başlatan çığdaki kritik elektron yoğunluğu, x_{kr} çığın bu büyüklüğe erişmesi için katetmesi gereken yol ve a elektrot açıklığı olmak üzere,

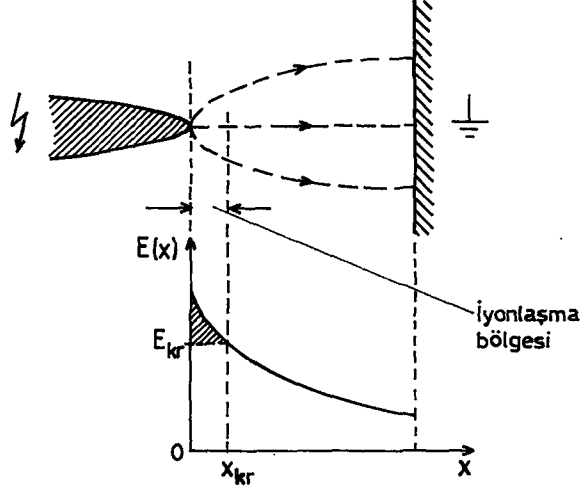
$$e^{\int_0^{x_{kr}(a)} \bar{\alpha} dx} = N_{kr} \quad (2.57)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda denklem (2.57),

$$\int_0^{x_{kr}(a)} \bar{\alpha} dx = \ln N_{kr} \approx 18 - 20 \quad (2.58)$$

biçimine dönüşür.

Şekil 2.10, pozitif sivri uç-düzlem elektrot düzeninde, düzgün olmayan alan dağılımını göstermektedir. Denklem (2.58), doğrudan delinme ya da



Şekil 2.10. Düzgün olmayan alanda elektrik alan dağılımı.

yalnızca korona olmasına bağlı olarak delinme ya da boşalma başlama geriliminin hesaplanmasına uygulanabilir.

BÖLÜM 3

KÜRE-DÜZLEM ve KÜRE-PÜRÜZLÜ DÜZLEM ELEKTROT SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL ALAN HESABI

Bu bölümde, çalışmada düzgün olmayan alanda delinmenin incelenmesinde göz önüne alınan küre-düzlem elektrot sisteminde elektriksel alan dağılımının analitik ve sayısal incelemeleri yapılmıştır. Analitik incelemelerde yaklaşık hesap yönteminden ve düzgün alanda iletken bir kürenin alan dağılımının hesabından yararlanılmıştır. Problemin sayısal incelemesi sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. İncelemelerde düzlem elektrot yüzeyinde yarı küresel pürüz bulunması durumu da göz önüne alınmıştır.

3.1. Küre-Düzlem Elektrot Sisteminde Yaklaşık Alan Hesabı

Küre-düzlem elektrot sisteminin elektriksel alan şiddeti, eş merkezli küresel elektrot sisteminin alan şiddetinden yararlanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Bilindiği gibi iç ve dış yarıçapları, sırasıyla r_1 ve r_2 olan eş merkezli iki küreden oluşan elektrot sisteminde alan şiddeti ifadesi,

$$E = U \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \frac{1}{r^2} \quad (3.1)$$

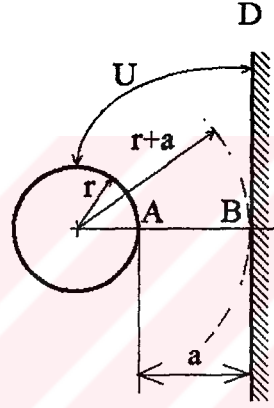
biçimindedir. Sistemde maksimum alan şiddeti eğrilik yarıçapı küçük olan elektrot üzerinde olup değeri,

$$E_{\max} = \frac{U}{r_2 - r_1} \frac{r_2}{r_1} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile verilir.

Küre-düzlem elektrot sisteminin alan şiddeti ifadesi, (3.2) bağıntısından yararlanılarak yaklaşık olarak elde edilebilir. Küre-düzlem elektrot sisteminde

maksimum alan şiddeti, iki elektrot arasında en dar bölgede ve eğrilik yarıçapı küçük olan elektrot üzerindedir. Buna göre maksimum alan şiddeti, şekil 3.1'de gösterildiği gibi, her iki elektroda dik olan AB doğrusunun küreyi kestiği A noktasındadır ve karşı elektrodun eğrilik yarıçapına bağımlılığı azdır. Dolayısıyla verilen sistemde D düzlemi yerine, bu düzleme B noktasında teğet olan $(r+a)$ yarıçaplı eş merkezli küre, karşı elektrot olarak alınabilir. Düzlem elektrot yerine kürenin ele alınması, alan dağılımında belirli bir değişikliğe yol açacaktır. Ancak, ortaya çıkan alan değişikliğinin her noktada aynı değerde olmayacağı ve özellikle A noktasındaki alanda bir miktar büyüme biçiminde ortaya çıkan değişikliğin, diğer noktalardaki değişikliklere göre küçük olacağı açıktır.



Şekil 3.1. Küre-düzlem elektrot sistemi.

Bu açıklamalara göre, küre-düzlem elektrot sisteminde maksimum alan şiddeti, eş merkezli küresel sisteme ilişkin bağıntılardan hesaplanabilir ve ortaya çıkabilecek hata, bir düzeltme katsayısı yardımıyla düzeltilebilir [23, 27].

Küre-düzlem elektrot sisteminde maksimum alan şiddeti için, a elektrot açıklığı ve r küre yarıçapı olmak üzere, eş merkezli küresel elektrot sisteminde maksimum alan şiddetini veren bağıntıda, $r_1 \rightarrow r$, $r_2 \rightarrow r+a$ ve $r_2 - r_1 \rightarrow a$ değerleri konup, k düzeltme katsayısı da göz önüne alınırsa,

$$E_{\max} = k \frac{U}{a} \frac{r+a}{r} \quad (3.3)$$

bağıntısı elde edilir.

3.2. Düzgün Alanda İletken Bir Yarım Küre Dışında Alan Şiddeti

Çok geniş ve dielektrik katsayısı ε_1 olan bir ortamda düzgün bir alan içinde bulunan, dielektrik sabiti ε_2 ve yarıçapı r olan yalıtkan bir kürenin içinde ve dışındaki maksimum alan şiddetleri için, düzgün alan şiddeti E_0 olmak üzere,

$$E_{i\max} = \frac{3\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} E_0 \quad (3.4)$$

$$E_{d\max} = \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} E_0 \quad (3.5)$$

ifadeleri yazılabilir [27].

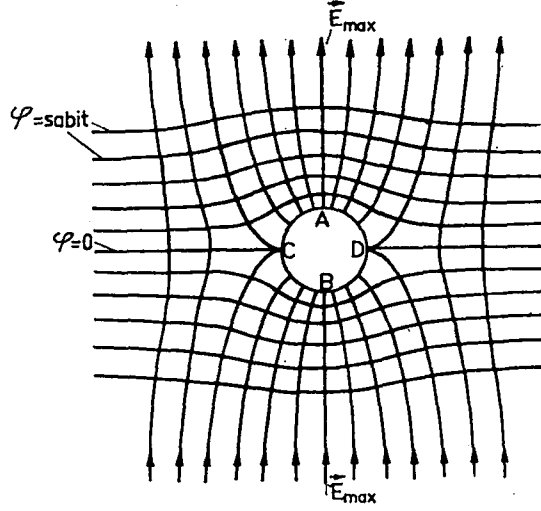
Söz konusu yalıtkan yüksüz kürenin yerini iletken bir kürenin alması durumunda, $\varepsilon_2/\varepsilon_1 \rightarrow \infty$ olacağından, küre içindeki alan sıfır olur. Bu durumda küre dışındaki alanın maksimum değeri ise,

$$E_{d\max} = 3 E_0 \quad (3.6)$$

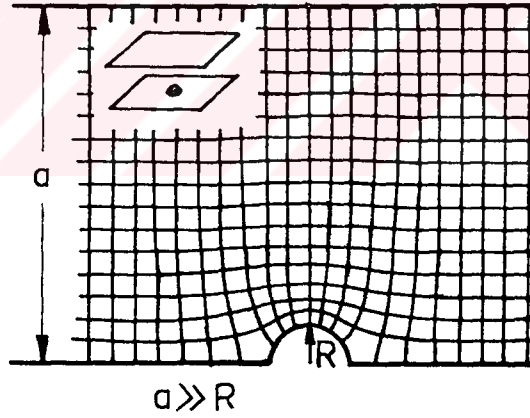
olur. Bu bağıntılardan, iletken küre yüzeyindeki elektriksel zorlanmanın, küre yarıçapından bağımsız olduğu ve maksimum zorlanmanın, düzgün alan zorlanmasının üç katına eşit olduğu görülmektedir. Düzgün alan içinde böyle yüksüz ve iletken bir küre çevresindeki elektriksel alan ve potansiyel dağılımı, şekil 3.2 'de gösterilmiştir. Alan dağılımından görüldüğü gibi, küre çevresinde düzgün olmayan alan, küreden uzaklaştıkça düzgün bir alan haline gelmekte ve çok uzak noktalarda da düzgün alana dönüşmektedir.

Düzgün alan içindeki iletken küre sistemi, şekil 3.2'deki C ve D noktalarından geçen ve potansiyeli $\varphi=0$ olan sonsuz genişlikteki simetri düzlemi yardımı ile iki ayrı düzlemde yarım küre sistemine ayrılabilir. Alan şeklinde bir değişiklik olmayacağından, küre durumundaki bağıntılar, sonsuz genişlikte bir düzlem üzerinde yarım küre durumu için de geçerli olur.

Böyle bir sisteme örnek olarak, şekil 3.3 'te gösterilen ve elektrotlardan birinin üzerinde bir yarım küre bulunan paralel düzlemsel elektrotlu düzgün alanlı bir sistem gösterilebilir. Ancak yukarıdaki ifadelerin yaklaşık olarak



Şekil 3.2. Düzgün alanda yüksüz iletken bir küre çevresinde alan ve potansiyel dağılımı.



Şekil 3.3. Düzgün alanda yarım küre.

geçerli olabilmesi için, sistemin a elektrot açıklığının, yarım kürenin r yarıçapına göre oldukça büyük olması ve kenar etkilerinin göz ardı edilebilmesi için de elektrotların geniş olması gerekir.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Küre-Düzlem ve Küre-Pürüzlü Düzlem Elektrot Sistemlerinde Elektriksel Alanın İncelenmesi

Bu alt bölümde, eksenel simetrikli problem özelliği gösteren ve deneylerde kullanılan küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinin

alan dağılımları, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenecektir. Burada "eksenel simetri" sözü ile bir düzenin simetri eksenini boyunca alınan bir kesitin, bu eksen etrafında döndürüldüğünde değişmeyeceği anlatılmaktadır. Bu özellik sayesinde bu tür problemler üç boyutlu olmalarına karşın, iki boyutlu olarak incelenebilirler [28-38].

3.3.1. Problemin Silindrisel Koordinat Sisteminde İncelenmesi

Koordinat sistemi, silindrisel koordinat sistemi olarak ele alındığında, dönel simetri nedeniyle herhangi bir (r, θ, z) noktasındaki potansiyelin değeri r ve z sabit kalmak koşuluyla θ ile değişmez. Bu durumda problem üç boyutlu bir uzay yerine (iki boyutlu) bir düzlem üzerinde incelenebilir (Şekil 3.4).

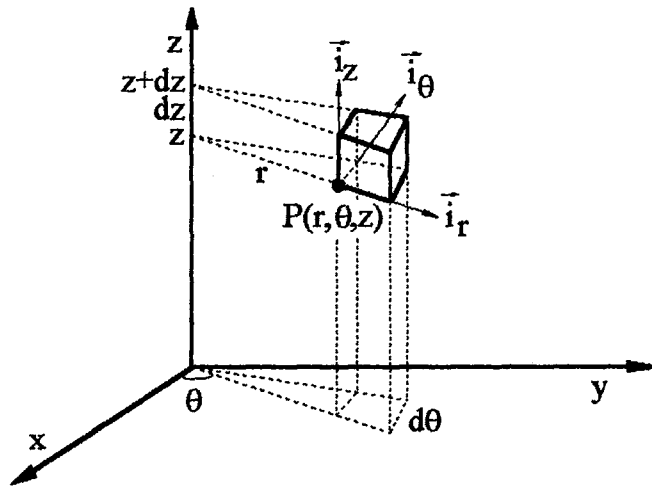
Silindrisel koordinatlarda üç boyutlu alan

$$\text{grad } V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (3.7)$$

şeklindedir. Burada potansiyelin θ dönme açısından bağımsız ($\partial V / \partial \theta = 0$) ve dolayısıyla $V=V(r, z)$ olması nedeniyle iki boyutlu olarak alan

$$\text{grad } V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (3.8)$$

biçiminde yazılabilir.



Şekil 3.4. Silindrisel Koordinat Sistemi.

3.3.2. Elektrostatik Enerji

İncelenen elektrot sisteminin simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki B çözüm bölgesinin yarısının simetri eksen etrafında 2π kadar döndürülmesiyle oluşan V hacmi içerisinde depolanan potansiyel enerji

$$W = \iiint \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV, \quad \vec{E} = -\text{grad } V, \quad dV = r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz$$

$$W = \frac{\epsilon}{2} \iiint |\text{grad } V|^2 r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz \quad (3.9)$$

dir. Burada $r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz$ sonsuz küçük dV hacmidir. (3.8) eşitliği (3.9) eşitliğinde yerine konur ve $\theta = 0 - 2\pi$ arasında integre edilirse enerji

$$W = \frac{\epsilon}{2} \int_0^{2\pi} \int \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz d\theta$$

$$W = \epsilon \pi \int \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz \quad (3.10)$$

olarak bulunur.

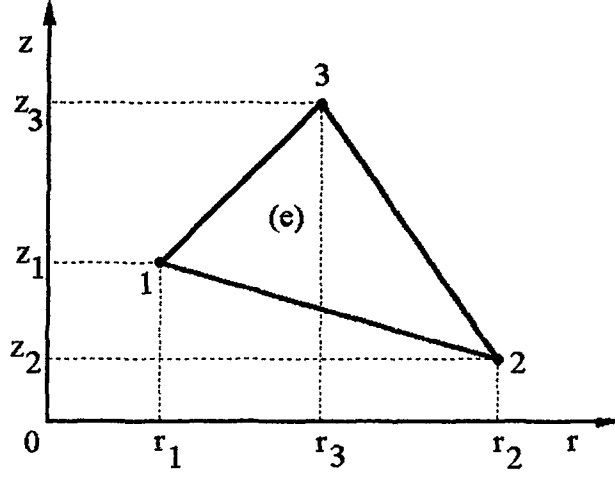
3.3.3. Problemin Formülasyonu

Potansiyelin, dönme açısı θ 'dan bağımsız olması dolayısıyla üçgen elemanlar r - z koordinat sisteminde tanımlanırlar. Şekil 3.5'de bir üçgen elemanın bu koordinat sisteminde tanımlanması gösterilmiştir. Burada r ve z radyal ve eksenel koordinatları göstermektedir.

Üçgen elemanlar içinde potansiyelin doğrusal değişeceği kabul edilirse potansiyel

$$V = a + br + cz \quad (3.11)$$

şeklinde bir bağıntı ile verilebilir. (3.11)'deki potansiyel işlevi her düğüm için yazılırsa



Şekil 3.5. Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen eleman.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

elde edilir. (3.12)'deki denklem takımından a, b ve c katsayıları örneğin Cramer kuralı ile bulunabilir. Katsayılar matrisinin determinanı

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} = 2S = (r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1) \quad (3.13)$$

dir. S üçgen elemanın alanı olmak üzere, bu determinant üçgenin alanının iki katına (2S) eşittir. a, b ve c katsayıları Cramer yöntemine göre

$$a = \frac{\begin{vmatrix} V_1 & r_1 & z_1 \\ V_2 & r_2 & z_2 \\ V_3 & r_3 & z_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad b = \frac{\begin{vmatrix} 1 & V_1 & z_1 \\ 1 & V_2 & z_2 \\ 1 & V_3 & z_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r_1 & V_1 \\ 1 & r_2 & V_2 \\ 1 & r_3 & V_3 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (3.14)$$

eşitliklerinden bulunur. (3.14) eşitliğindeki işlemlerin sonucunda

$$a = \frac{1}{2S} [(r_2 z_3 - r_3 z_2) V_1 + (r_3 z_1 - r_1 z_3) V_2 + (r_1 z_2 - r_2 z_1) V_3]$$

$$a = \frac{1}{2S}(a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_3 V_3)$$

$$b = \frac{1}{2S}[(z_3 - z_2)V_1 + (z_1 - z_3)V_2 + (z_2 - z_1)V_3]$$

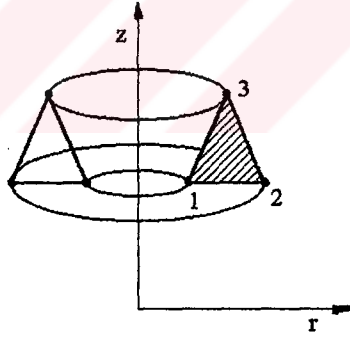
$$b = \frac{1}{2S}(b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3)$$

$$c = \frac{1}{2S}[(r_3 - r_2)V_1 + (r_1 - r_3)V_2 + (r_2 - r_1)V_3]$$

$$c = \frac{1}{2S}(c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3) \quad (3.15)$$

olarak bulunur.

$V=a+br+cz$ 'nin $\partial V/\partial r$ ve $\partial V/\partial z$ şeklindeki türevleri düzenlenerek (3.10)'da yerine konulursa, bir üçgen elemanın z-ekseni etrafında 2π kadar döndürülmesiyle şekil 3.6 'daki üçgen kesitli bir halka elemanın oluşturduğu



Şekil 3.6. Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen kesitli halka eleman.

hacim içerisindeki enerji, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ve $\epsilon_r^{(e)}$ eleman içindeki ortamın bağıl dielektrik sabiti olmak üzere,

$$V = a + br + cz$$

$$\frac{dV}{dr} = b, \quad \frac{dV}{dz} = c$$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)} \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r \, dr \, dz$$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)} \pi (b^2 + c^2) \iint_{S^{(e)}} r \, dr \, dz$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^{(e)}$$

$$W^{(e)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^{(e)} \cdot \pi \cdot (b^2 + c^2) \iint_{S^{(e)}} r \, dr \, dz \quad (3.16)$$

biçiminde elde edilir. Şekil 3.5'teki üçgen elemanın $S^{(e)}$ yüzeyi üzerinden yapılan integrasyon işleminin sonucu

$$\iint_{S^{(e)}} r \, dr \, dz = \frac{S}{3} (r_1 + r_2 + r_3) = S \cdot r_c \quad (3.17)$$

$$r_c = \frac{1}{3} (r_1 + r_2 + r_3)$$

olur ve (3.16)'da yerine konulursa bir üçgen kesitli halka elemanı içinde biriken enerji

$$W^{(e)} = \varepsilon_r^{(e)} \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot (b^2 + c^2) \cdot S \cdot r_c = \varepsilon_r^{(e)} \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot E^2 \cdot S \cdot r_c \quad (3.18)$$

olur. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), tüm bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırılması) ilkesine dayanır. Ele alınan bir elemanın enerjisi elemanın düğüm potansiyellerine bağlı olarak yazılabildiğinden düğüm potansiyellerine göre enerjinin minimum değeri

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.19)$$

yapılırsa

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^{(e)} \cdot \pi \cdot S \cdot \left[2b \frac{\partial b}{\partial V_i} + 2c \frac{\partial c}{\partial V_i} \right] r_c = 0 \quad (3.20)$$

$i=1,2,3$ olmak üzere

$$[K^{(e)}][V^{(e)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(e)} & k_{12}^{(e)} & k_{13}^{(e)} \\ k_{21}^{(e)} & k_{22}^{(e)} & k_{23}^{(e)} \\ k_{31}^{(e)} & k_{32}^{(e)} & k_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

3x3 boyutunda "eleman katsayılar matrisi" $[K^{(e)}]$ elde edilir. (3.20)'deki cebirsel işlemler sonucunda simetrik bir matris olan katsayılar matrisinin elemanları

$$k_{11}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_1^2 + c_1^2) r_c$$

$$k_{12}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_1 b_2 + c_1 c_2) r_c$$

$$k_{13}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_1 b_3 + c_1 c_3) r_c$$

$$k_{21}^{(e)} = k_{12}^{(e)}$$

$$k_{22}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_2^2 + c_2^2) r_c$$

$$k_{23}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_2 b_3 + c_2 c_3) r_c$$

$$k_{31}^{(e)} = k_{13}^{(e)}$$

$$k_{32}^{(e)} = k_{23}^{(e)}$$

$$k_{33}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \cdot \pi}{2S} (b_3^2 + c_3^2) r_c$$

biçiminde bulunur. Bu eşitliklerde

$$a_1 = r_2 z_3 - r_3 z_2$$

$$a_2 = r_3 z_1 - r_1 z_3$$

$$a_3 = r_1 z_2 - r_2 z_1$$

$$b_1 = z_3 - z_2$$

$$b_2 = z_1 - z_3$$

$$b_3 = z_2 - z_1$$

$$c_1 = r_3 - r_2$$

$$c_2 = r_1 - r_3$$

$$c_3 = r_2 - r_1$$

$$r_c = \frac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^{(e)}$$

$$S = \frac{1}{2}(b_2 c_3 - b_3 c_2) \quad (3.22)$$

biçimindedir. Yukarıda anlatılan minimumlaştırma ilkesi çözümün yapılacağı bölgedeki elemanlara aynı anda uygulanacak olursa, tanımlanan tüm elemanların düğüm potansiyelleri arasındaki bağıntı bir lineer denklem sistemine dönüşür.

$$[K][V] = 0 \quad (3.23)$$

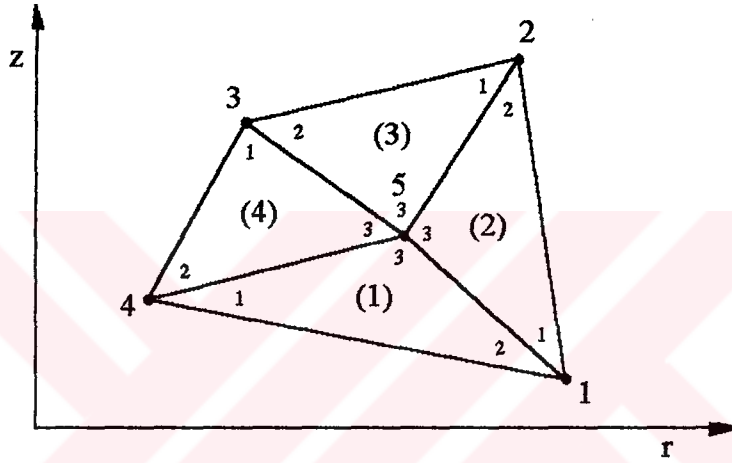
Bu denklemde $[V]$, sistemin düğüm noktalarının potansiyellerinden oluşan bir sütun matristir. $[K]$ matrisi simetrik, tekil olmayan ve seyrek bir matristir.

(3.23)'te elde edilen lineer denklem sistemindeki katsayılar matrisinin seyrek bir matris olması nedeniyle, doğrudan matris tersi alma yöntemlerinden yararlanmak hem gereksiz bellek kaybına neden olacak, hem de büyük boyutlu matrislerde bilgisayarın yuvarlatma hatası dolayısıyla hata miktarı artacaktır. Bu nedenle bu gibi bilinmeyen sayısının birkaç yüzü geçtiği durumlarda

yinelemeli yöntemler önem kazanır. Bu amaçla yinelemeli çözüm yöntemi olarak örneğin ardışık üst yinelemeler S.O.R. (Successive Over-Relaxation) yöntemi kullanılabilir [28,29].

Minimumlaştırma işlemi örneği:

Şekil 3.7'deki üçgen elemanlar incelendiğinde, 5 numaralı düğüme ait V_5 potansiyeli değerinin, bu düğüme komşu dört düğümün potansiyel değerlerine bağlı olduğu görülür. Benzer şekilde 1, 2, 3 ve 4 düğümlerinin potansiyel değerleri de bu düğümlere komşu düğümlerin potansiyel değerlerine bağlıdır.



Şekil 3.7. Üçgen elemanlardan oluşmuş ağdan bir bölüm.

(1), (2), (3) ve (4) numaralı elemanların enerjilerini aynı anda minimum yapan V_5 değeri aranır

$$\frac{\partial W}{\partial V_5} = \frac{\partial \left[\sum_{e=1}^4 W^{(e)} \right]}{\partial V_5} = 0 \quad (3.24)$$

yazılabilir. Bu minimumlaştırma işleminin sonucunda

$$\left[k_{31}^{(1)} V_4 + k_{32}^{(1)} V_1 + k_{33}^{(1)} V_5 + \right. \quad (1. \text{ elemandan})$$

$$k_{31}^{(2)} V_1 + k_{32}^{(2)} V_2 + k_{33}^{(2)} V_5 + \quad (2. \text{ elemandan})$$

$$k_{31}^{(3)} V_2 + k_{32}^{(3)} V_3 + k_{33}^{(3)} V_5 + \quad (3. \text{ elemandan})$$

$$k_{32}^{(4)}V_5 + k_{32}^{(4)}V_4 + k_{33}^{(4)}V_5 = 0 \quad (4. \text{ elemandan}) \quad (3.25)$$

elde edilir. (3.25) denklemi düzenlenirse

$$k_{15}V_1 + k_{25}V_2 + k_{35}V_3 + k_{45}V_4 + k_{55}V_5 = \sum_{i=1}^5 k_{i5}V_i = 0 \quad (3.26)$$

olur. Düğüm sayısı n_d ise

$$\sum_{i=1}^{n_d} k_{in_d} V_i = 0 \quad (\text{veya } m \text{ tane ise } \sum_{i=1}^m k_{im} V_i = 0)$$

$$V_5 = -\frac{1}{k_{55}} \sum_{i=1}^4 k_{i5} V_i \rightarrow V_n = -\frac{1}{k_{nn}} \sum_{i=1}^{n-1} k_{in} V_i$$

ve

$$k_{15} = k_{32}^{(1)} + k_{31}^{(2)}$$

$$k_{25} = k_{32}^{(2)} + k_{31}^{(3)}$$

$$k_{35} = k_{32}^{(3)} + k_{31}^{(4)}$$

$$k_{45} = k_{31}^{(1)} + k_{32}^{(4)}$$

$$k_{55} = k_{33}^{(1)} + k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)} + k_{33}^{(4)} = \sum_{e=1}^4 k_{33}^{(e)} \quad (3.27)$$

olarak elde edilir.

Doğrusal denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan yinelemeli yöntemlerde her düğüm için (3.26)'deki gibi bir denklemin kurulması ve sonra da iterasyona sokulması gerekir. Denklemi oluşturan k_{ij} terimlerinin hesaplanması ve iterasyona sokulacak düğüm potansiyelinin eşitliğin diğer tarafında yalnız bırakılması işlemi iterasyon için gereklidir.

Şekil 3.7'deki (1) numaralı eleman incelendiğinde, bu elemanın katsayılar matrisindeki m. satırının elemanlarının (3.27)'deki k_{ij} katsayılarına toplam olarak katkıda bulunduğu görülür. Bu aynı zamanda 5 düğümünü saran diğer elemanlar için de aynıdır ve diğer elemanlar da benzer şekilde katkıda bulunurlar. Bu durumda örneğin, herhangi bir elemanın 3. düğümüne ilişkin potansiyel

$$V_3 = -\frac{1}{\sum_T k_{33}} \left[\sum_T (k_{31} V_1 + k_{32} V_2) \right] \quad (3.28)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\sum_T$ işareti 3 düğümünü saran elemanların toplamını belirtmektedir. Şekil 3.7'deki 1, 2, 3 sayıları her üçgen için saat yönüne ters yönde olacak şekilde işaretlenmelidir.

3.3.4. Elektrik Alan Şiddeti Hesabı

İki boyutlu silindrsel koordinatlarda çözümlemelerde potansiyelin bir üçgen eleman içinde ($V = a + br + cz$) bağıntısına göre doğrusal olarak değiştiğinin kabul edilmesi nedeniyle elektrik alan şiddeti, E_r radyal alan bileşeni ve E_z eksenel alan bileşeni cinsinden

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_z^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} = \sqrt{b^2 + c^2} \quad (3.29)$$

olur. Bu işe, bir sonlu eleman içinde elektrik alanının, sabit bir değer aldığı anlamına gelir.

3.3.5. Yinelemeli Çözüm

Laplasyen alan problemlerinde belirli bir potansiyel değere sahip en az iki elektrot vardır. Tanımlanan elemanlara ait düğümlerin potansiyelleri bu iki elektrodun potansiyeli arasında bir değer alır. İterasyondan önce elektrotların üzerindeki düğümler hariç diğer bütün düğümlerin potansiyellerine başlangıç olarak

$$V^{(0)} = V_{ort} = \frac{1}{2}(V_{max} + V_{min}) \quad (3.30)$$

ortalama değeri verildikten sonra bu düğümler sırayla iterasyona sokulurlar. V_j 'nin

$$V_j = -\frac{1}{k_{jj}} \sum_{i=1}^{j-1} k_{ij} V_i \quad (3.31)$$

biçiminde hesaplanmasıyla j 'inci düğüm için yeni potansiyel değeri

$$V_j^{(n+1)} = V_j^{(n)} + \omega (V_j - V_j^{(n)}) \quad (3.32)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada ω rölaksasyon veya hızlandırma faktörü (ivme-lendirme katsayısı) olup $1 < \omega < 2$ arasında alacağı bir ω_0 değeri iterasyonun en hızlı yakınsamasını sağlar. ω_0 'ın yaklaşık değeri deneme-yanılma ile bulunabilir.

Elektrotlar üzerindeki düğümler iterasyona sokulmayıp, bu işlem süresince sabit bırakılırlar.

Her iterasyon tamamlandıktan sonra düğüm potansiyellerinin bir önceki iterasyona göre bağlı değişimlerinin maksimum değeri belirli bir ε hata sınırı altında kaldığında, yani

$$\max \left| \frac{V^{(n+1)} - V^{(n)}}{V^{(n)}} \right| < \varepsilon \quad (3.33)$$

olduğunda çözümün gerçek değere yeterince yakınsadığı kabul edilerek iterasyon durdurulur.

3.3.6. Küre-Düzlem ve Küre-Pürüzlü Düzlem Elektrot Sistemlerinde Potansiyel Dağılımı ve Maksimum Alan Şiddeti

Bu alt bölümde, yukarıda temelleri açıklanan sonlu elemanlar yöntemiyle küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde potansiyel dağılımı incelemelerinin sonuçları verilmiştir. İncelemelerde küre-düzlem elektrot sisteminin küre elektrodu olarak deneysel çalışma bölümünde kullanılan, 4 mm çapında küresel elektrot (2 mm çapındaki sapı ile birlikte) ve düzlem elektrot olarak da kenar etkisi göstermeyecek genişlikte (75 mm çapında) bir düzlem elektrot seçilmiştir. Küre-pürüzlü düzlem elektrot

sistemini temsil etmek üzere, aynı küre-düzlem elektrot sisteminde düzlem elektrodun ortasına yarıçapı 1 mm olan yarı küresel pürüz eklenmiştir.

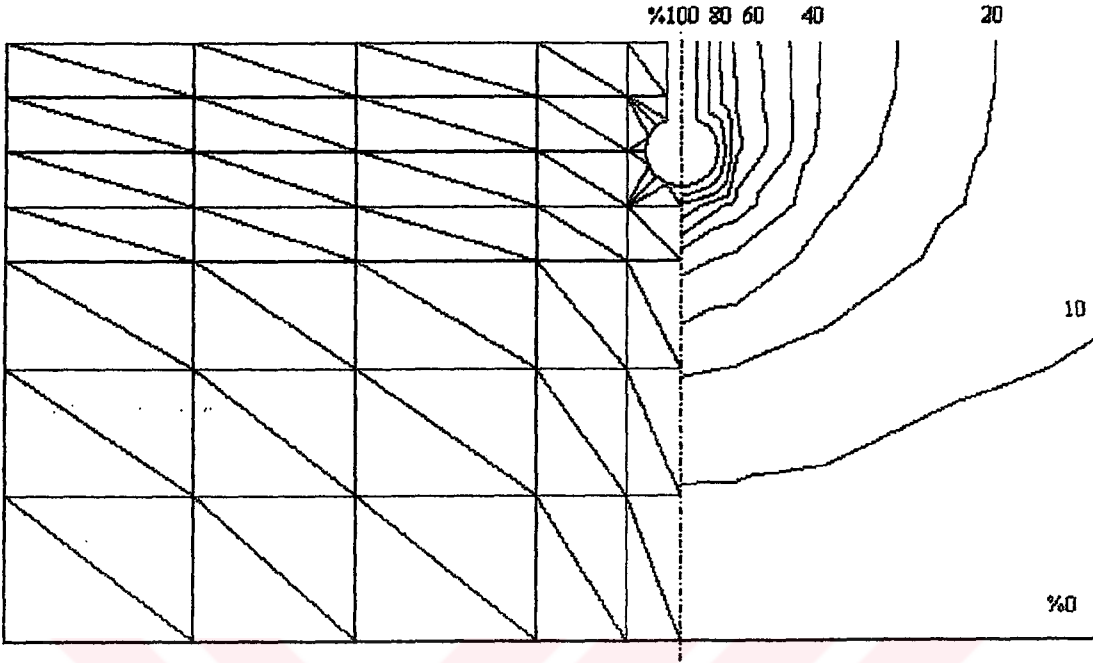
Problemin çözümü için geliştirilen bilgisayar programı, Quick-Basic dilinde yazılmış ve çözümlemede ardışık üst yinelemeler (S.O.R.) yöntemi kullanılarak, program kişisel bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Çözümlemeler, küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinin 25, 20, 15, 10 ve 5 mm açıklıkları için ayrı ayrı yapılmıştır. Söz konusu elektrot sistemlerine ilişkin olarak üçüncü aşamada elde edilen maksimum alan şiddetleri ile küre-düzlem elektrot sistemi için η elektrot sisteminin verimi (faydalanma faktörü) [27,39-43] ve ilkesi, Bölüm 3.1'de anlatılan yaklaşık alan hesabı ile bulunan maksimum alan şiddetleri, tablo 3-1'de verilmiştir. Küre-düzlem elektrot sisteminin maksimum alan şiddetlerinin hesaplanmasında, k yaklaşıklık katsayısı 0,8 seçilmiştir.

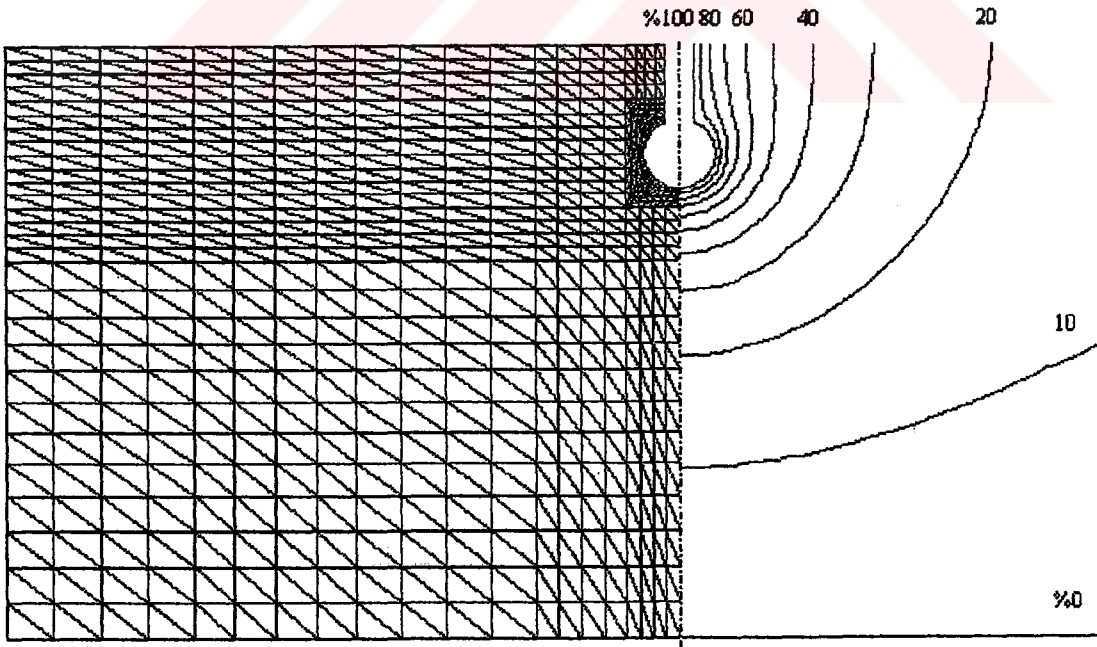
Tablo 3-1. Deneylerde kullanılan elektrot sistemlerinin verimlerinin ve maksimum alan şiddetlerinin elektrot açıklığı ile değişimi.

Elektrot açıklığı [mm]	Küre-düzlem elektrot sisteminde			Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde SEY E_{max}/U [1/mm]
	Elektrot verimi η	Yaklaşık hesap E_{max}/U [1/mm]	SEY E_{max}/U [1/mm]	
25	0,0994	0,432	0,4172	0,4247
20	0,1198	0,440	0,4378	0,4416
15	0,1514	0,453	0,4566	0,4595
10	0,2079	0,480	0,4839	0,4856
5	0,3395	0,560	0,5605	0,5609

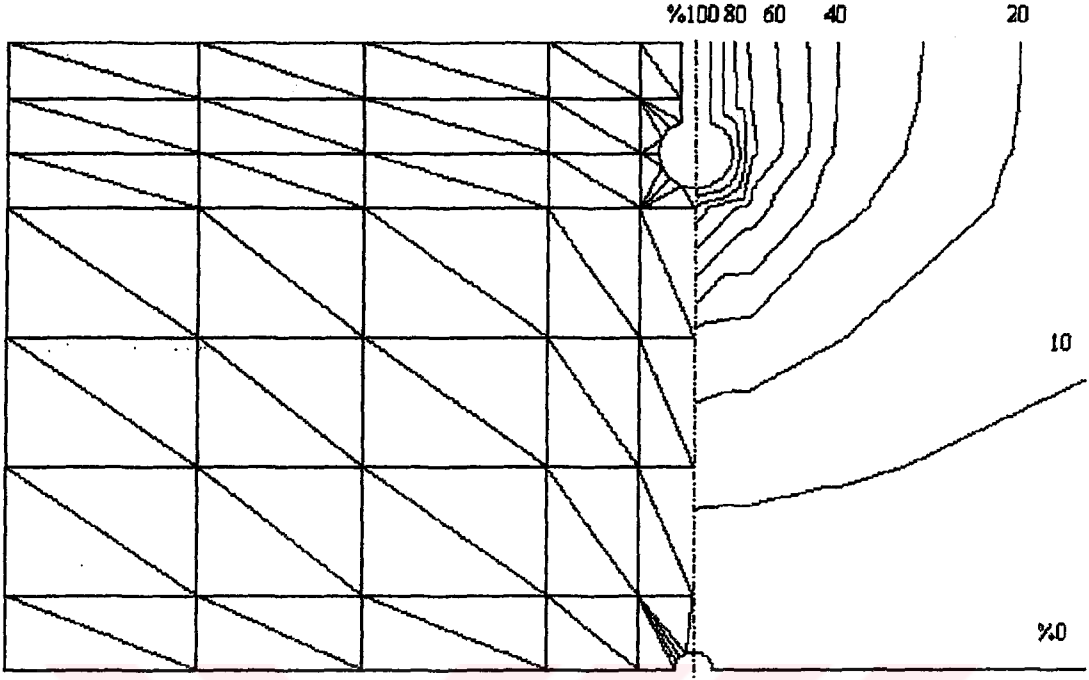
Küre-düzlem elektrot sisteminin 25 mm elektrot açıklığı için birinci (temel) bölmeleme aşamasında elde edilen sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı şekil 3.8'de; aynı düzene ilişkin, üçüncü aşamada elde edilen ağ (problemin temel ağı oluşturulduktan sonra hazırlanan bilgisayar programı ile her üçgen eleman dört alt üçgene bölünerek ağ sıklaştırılmıştır) ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı, şekil 3.9'da gösterilmiştir. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde 25 mm elektrot açıklığı için benzer biçimde birinci bölmelemeye ilişkin sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı, şekil 3.10'da, aynı düzene ilişkin, üçüncü aşamada elde edilen ağ ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı şekil 3.11'de verilmiştir.



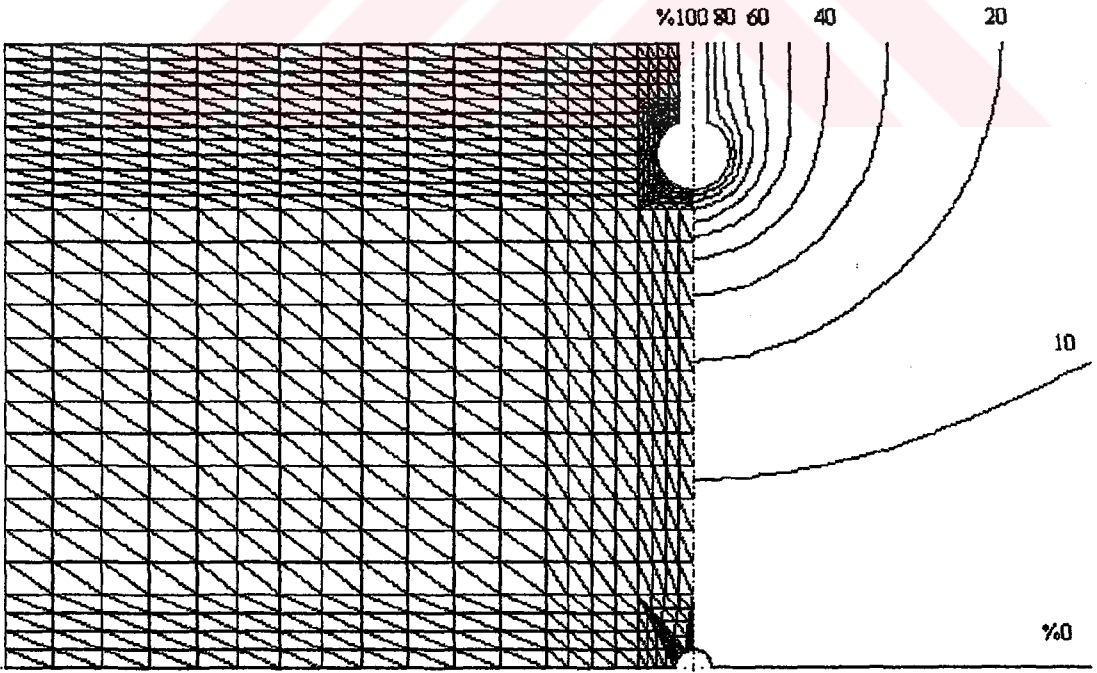
Şekil 3.8. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 25 mm, 1. aşama).



Şekil 3.9. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 25 mm, 3. aşama).



Şekil 3.10. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı:1 mm, elektrot açıklığı: 25 mm, 1. aşama).



Şekil 3.11. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı:1 mm, elektrot açıklığı: 25 mm, 3. aşama).

Küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde 15 mm elektrot açıklığı için elde edilen birinci ve üçüncü bölmeleme aşamalarına ilişkin sonlu eleman ağırları ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımları Ek-A'da; aynı elektrot sistemlerinde 5 mm elektrot açıklığına ilişkin sonlu eleman ağırları ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımları ise Ek-B'da verilmiştir.

Gerek şekil 3.9-3.11'de gerekse Ek-A ve Ek-B'de verilen potansiyel dağılımları incelendiğinde, eşpotansiyel çizgilerinin küre elektrot yakınında sıklaştığı, dolayısı ile elektrik alan şiddetinin arttığı ve maksimuma ulaştığı görülmektedir. Pürüzlü duruma ilişkin elde edilen potansiyel dağılımında, pürüzün potansiyel dağılımını değiştirdiği ve elektrik alanının, pürüzün küre elektroda bakan tepe noktasında bir miktar yükseldiği görülmektedir.

Küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen maksimum alan şiddetleri (Tablo 3-1) arasındaki fark, elektrot açıklığı küçüldükçe azalmakta ve küçük açıklıklarda hemen hemen ortadan kalkmaktadır. Bu azalma; küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde elektrot açıklığının, pürüzün tepe noktası ile küre arasında ölçüldüğü hatırlanırsa; küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde etkin elektrot yüzeyinin, aynı elektrot açıklığına sahip küre-düzlem elektrot sistemindekine göre küçülmesine [44,45] bağlanabilir.

BÖLÜM 4

DARBE GERİLİMİNDE HAVA, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 GAZLARINDA DELİNME GERİLİMİNİN DENEYSEL OLARAK SAPTANMASI

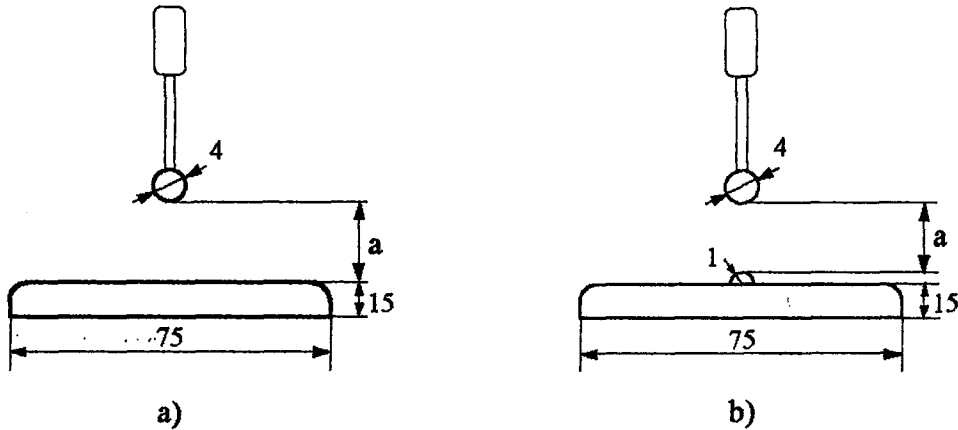
4.1. Deney Düzeni

4.1.1. Elektrot sistemi

Deneylerde düzgün olmayan elektrik alan dağılımına sahip küre-düzlem elektrot sistemi kullanılmıştır. Küresel elektrot, krom kaplı pirinç malzemeden yapılmış olup, 4 mm çaplıdır.

Düzlem elektrot 75 mm çapında, 15 mm kalınlığında kenarları yuvarlatılmış disk biçiminde pirinç malzemeden yapılmış bir elektrottur. Ayrıca, elektrot yüzey pürüzlülüğünün, hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazlarının darbe delinme dayanımlarına etkisini incelemek amacıyla pürüzlü düzlem bir elektrot da kullanılmıştır. Bu elektrot, düzlem elektrot ile aynı boyutlarda olup, küreye bakan yüzeyinin ortasında yapay olarak aynı malzemeden 1 mm yarıçaplı yarıküresel pürüz oluşturulmuştur.

Söz konusu küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemleri, boyutları ile birlikte şekil 4.1. a) ve b) 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elektrot sistemleri

a) Küre-düzlem elektrot sistemi

b) Küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemi.

Deneylerde elektrot açıklıkları 5; 10; 15; 20 ve 25 mm olarak seçilmiş ve metalden yapılmış şekil 4.2'de gösterilen özel masterlarla ayarlanmıştır.



Şekil 4.2. Elektrot açıklığını ayarlamakta kullanılan 5; 10; 15; 20 ve 25 mm kalınlıklarındaki masterlar.

4.1.2. Basınç sistemi

Basınç sistemi, basınç kabı, pompa ve manometrelerden oluşmaktadır.

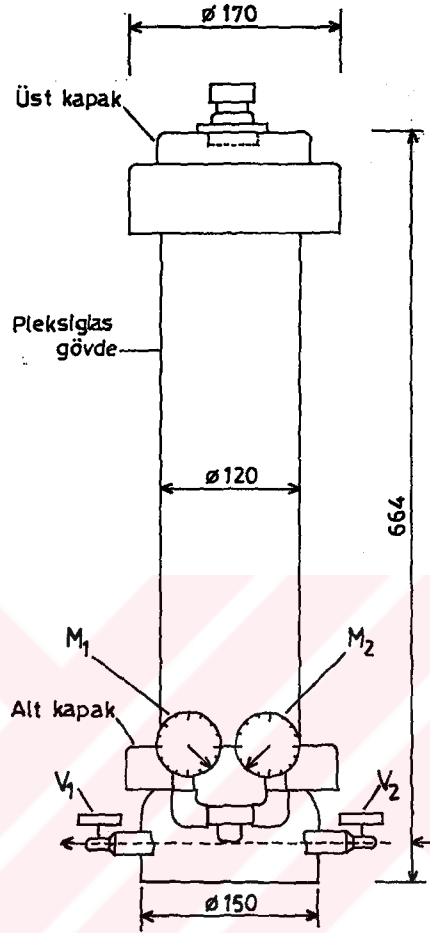
4.1.2.1. Basınç kabı

Basınç kabı, gövdesi silindirik biçiminde pleksiglastan, alt ve üst bölümleri dökme alüminyumdan yapılmış, ~120 mm iç çapında ve ~6 lt hacminindedir. Kap, açık hava basıncı 0 bar olmak üzere, (-1; +5) bar basınçlarında kullanılabilir. Basınç kabı, gaz doldurma ve boşaltma vanaları ve ayrıca vakum düzeyini ve gaz basıncını gösteren iki adet manometre ile donatılmıştır.

Yüksek basınç altında elektrot açıklığını değiştirebilmek amacıyla basınç kabının üst kapağı delinerek düşey doğrultuda hareket edebilen ve ucuna, küresel elektrodun bağlanmasını sağlayacak biçimde uygun vida dışı açılmış, 8 mm çapında cıva çeliği bir çubuk yerleştirilmiştir. Bu kapağın her iki tarafı, gerek vakumda gerekse yüksek basınçta sızdırmazlığı sağlamak üzere birer keçe ile donatılmıştır. Basınç kabı, boyutları ile birlikte şekil 4.3'te gösterilmiştir.

4.1.2.2. Vakum pompası

Deneyde kullanılacak olan gaz, basınç kabına doldurulmadan önce kap içindeki havayı boşaltmak için Leybold-Heraeus marka S4A model tek fazlı bir vakum pompası kullanılmıştır.



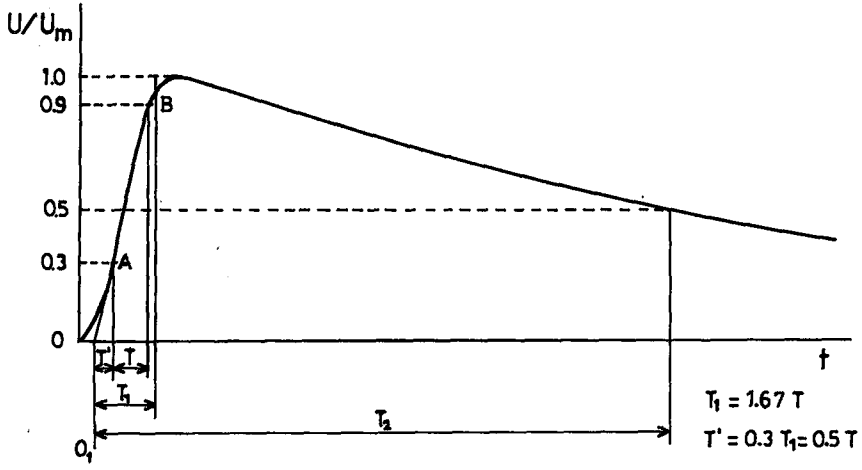
Şekil 4.3. Basınç kabı.

4.1.2.3. Manometre

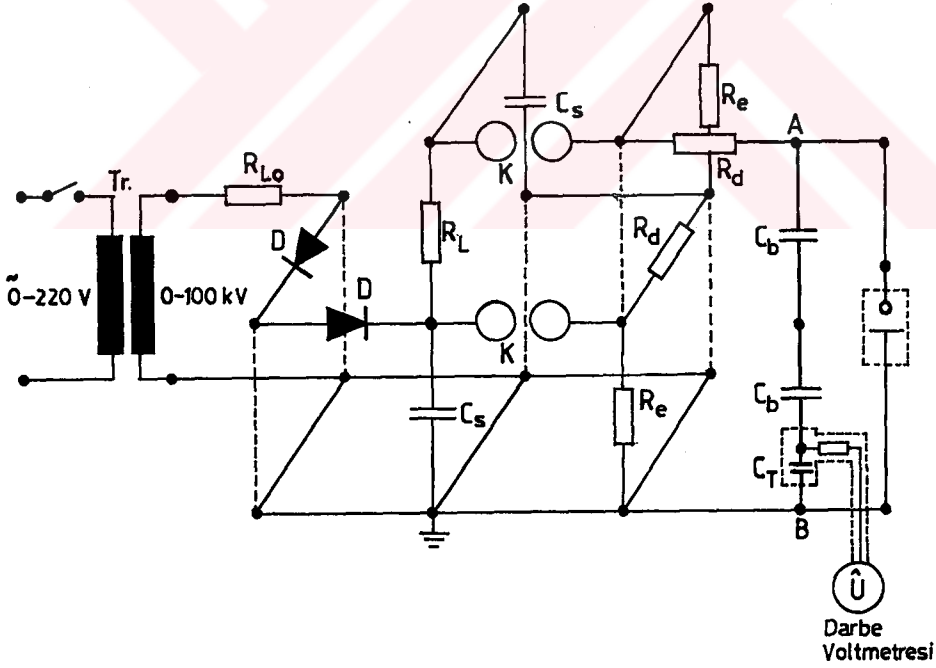
Basınç kabı üzerinde iki adet analog manometre (şekil 4.3'te M_1 ve M_2) bulunmaktadır. Manometrelerden biri vakum düzeyini gösteren (-1; 0) bar'lık; diğeri, gaz basıncını gösteren (0; 6) bar'lık manometredir.

4.1.3. Darbe gerilimi üretici

Standart 1,2/50 μs 'lik darbe gerilimleri (şekil 4.4), maksimum çıkış gerilimi 260 kV_{tepe} ve darbe enerjisi 100 J olan iki katlı darbe gerilimi üreticinden elde edilmiştir. Söz konusu üreticinin montaj şeması, şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Standart 1,2/50 μ s'lik darbe gerilimi.



Şekil 4.5. İki katlı darbe gerilimi üretici.

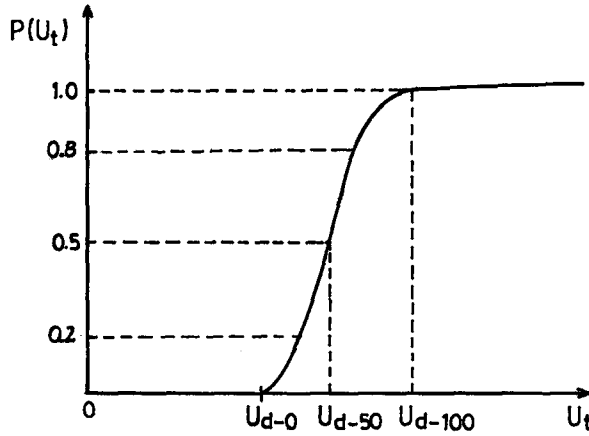
4.1.4. Darbe gerilimlerinin ölçülmesi

Darbe gerilimlerinin tepe değerleri, bir kapasitif gerilim bölücü yardımıyla ölçme hatası ($U \geq 48 \text{ kV}_{\text{tepe}}$ için) $< \%1$ olan MWB Messwandler Bau marka, DSTM model dijital darbe gerilimi tepe değer ölçü aleti ile ölçülmüştür.

4.1.5. Atlama geriliminin belirlenmesi

Bilindiği üzere, herhangi bir aygıtta darbe gerilimi uygulandığında bir atlamanın olup olmamasından, uygulanan darbe gerilimi tepe değerinin, aygıtın darbe delinme (ya da dayanma) gerilimine yakınlığı konusunda herhangi bir şey söylenemez. Darbe geriliminde boşalma olayı istatistiksel bir olay olduğundan bu konuda, ancak çok sayıda darbe uygulanması ile bir fikir edinilebilir.

Bir aygıtın veya elektrot sisteminin darbe geriliminde atlama (delinme) gerilimi, söz konusu aygıtta (elektrot sistemine) bir dizi darbe gerilimi uygulanarak bulunur. Uygulanan darbe sayısının yaklaşık yarısında atlama oluşturan darbe geriliminin genliği saptanır. Bu durumda darbe delinme olasılığı $p(U)$ yaklaşık olarak %50 olur. Bir elektrot sistemine uygulanan darbe gerilimlerinin yinelenmesi ile darbe delinme gerilimine ilişkin olarak, şekil 4.6'da gösterilen delinme olasılığı dağılımı elde edilir. Buna göre, %0 ve %100 delinme olasılıkları; diğer bir deyişle (U_{d-0}) yüzde sıfır ve (U_{d-100}) yüzde yüz delinme gerilimleri, ancak yaklaşık olarak tanımlanabilirler. Dolayısıyla bu büyüklükler, tanım büyüklükleri olarak kullanılmaya elverişli değildirler.



Şekil 4.6. Darbe geriliminde delinme olasılığı dağılım fonksiyonu.

Uygulamada, ancak çok sayıda darbe gerilimi uygulanarak tam olarak belirlenebilen yüzde elli atlama gerilimi (U_{d-50}) (%50 delinme olasılığı) yerine, genellikle bu değerin bir miktar üstündeki ve altındaki gerilimlerde atlama

olasılıkları belirlenir. Sonra bu değerlerden yararlanılarak, özel olasılık kağıtları ve/veya interpolasyonla yüzde elli atlama gerilimi (U_{d-50}) yaklaşık olarak bulunur [46-55].

Darbe geriliminde delinme olasılığı dağılımı (şekil 4.6) incelendiğinde, gerilim-delinme olasılığı eğrisinin, %20-%80 değerleri arasında yaklaşık olarak doğru biçiminde olduğu görülmektedir. Bu doğrusalıktan yararlanılarak, bu çalışmada %50 atlama geriliminin, en küçük kareler yöntemine göre birinci dereceden eğri (doğru) uydurma yolu ile belirlenebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla, uygulanan gerilimleri ve bunlara karşı düşen olasılıkları giriş verileri olarak alıp, yüzde elli atlama gerilimini hesaplayan basit bir programdan yararlanılmıştır.

4.2. Deneyin yapılışı

Herbir elektrot sistemi, CCl_4 (karbon tetra klorür)'le temizlendikten sonra basınç kabına, üst kapağı sökülerek yerleştirilmiş ve kapak, sızdırmazlığı sağlayacak biçimde sıkıca kapatılmıştır. Elektrot açıklığının sıfırı, küresel elektrodun bağlandığı ve hareket edebilen çelik çubuk üzerine yerleştirilen referans mastarı tesbit edilmiş ve ardından elektrot açıklığı, açıklık mastarları (şekil 4.2) ile istenen değerlere ayarlanmıştır. Böylece, yüksek basınç altında bile elektrot açıklığının değiştirilebilmesi olanağı elde edilmiş ve ayrıca kabın açılıp kapanmasından kaynaklanacak gaz ve zaman kaybı büyük oranda önlenmiştir.

Deneylerde kullanılan gazlar doldurulmadan önce basınç kabı, vakum pompası ile $\sim 10^{-1}$ mmHg basıncında 30 dakika kadar vakumlanmış, ardından ilgili gaz ya da gaz karışımları doldurulmuştur. Gaz doldurma işleminden sonra, ortamın kararlı duruma gelmesi için, tek gaz (hava, N_2 ve SF_6) ile yapılan deneylerde en az 30 dakika; SF_6+N_2 karışımlarının her bir oranında ise en az 2 saat beklenmiştir.

Basınç kabı, yukarıda anlatıldığı gibi vakumlandıktan sonra, hava, N_2 ve SF_6 gazı ile yapılan deneylerde normal basınca (~ 0 bar) kadar ilgili gaz doldurulmuş, en az 30 dakika beklendikten sonra, darbe delinme gerilimleri belirlenmiştir. Sonra, kaptaki gaz basıncı 0,5 bar arttırılmış ve 30 dakikalık bekleme süresinin ardından deneylere devam edilmiştir. Bu süreç her bir gaz için, 0,5 bar'lık basınç artırımları ile 4 bar basınca kadar yinelenmiştir.

Gaz karışımlarının elde edilmesinde ise, sabit sıcaklıkta kapalı bir kap-
taki gazın basıncı b ve hacmi V olmak üzere,

$$b V = C = \text{sabit} \quad (4.1)$$

biçiminde ifade edilen Boyle-Mariotte yasası esas alınmış ve buna göre, b toplam basınç ve $b_1, b_2, \dots, b_n$ değerleri, 1, 2,..., n gazlarının kısmi basınçları olmak üzere,

$$b = b_1 + b_2 + \dots + b_n \quad (4.2)$$

biçiminde türetilen kısmi basınçlar yasasından yararlanılmıştır [21]. Bu eşitliğe göre, belirli bir oran ve basınçta bir karışım elde etmek için basınç kabına, önce kısmi basıncı (dolayısıyla hacmi) küçük olan gaz ve ardından, istenen toplam basınç elde edilinceye kadar, kısmi basıncı (dolayısıyla hacmi) büyük olan gaz doldurulmuştur [9]. N_2+SF_6 gaz karışımının tüm kap içinde oransal olarak düzgün dağılması için belirli bir süre beklenmesi gerektiği [56] göz önüne alınarak, gaz karışımları basınç kabına doldurulduktan sonra en az iki saat beklenmiş ve ardından deneylere geçilmiştir.

Deneylerde gaz basıncı, açık hava basıncı 0 bar kabul edilerek, tek gazla yapılan deneylerde 0,5 bar'lık artımlarla; gaz karışımlarında ise 1 bar'lık artımlarla 0-4 bar arasında değiştirilmiştir.

Elektrotları koşullamak amacıyla atlama gerilimlerinin ölçülmesine geçmeden önce, farklı her gaz basıncı ve oranı için darbe geriliminde onar atlama yaptırılmıştır.

Deneyler küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneylerde gerilim küresel elektroda uygulanmış, düzlem elektrot ise topraklanmıştır.

Deneyler, pozitif ve negatif kutbiyetli 1,2/50 μs 'lik standard yıldırım darbe gerilimleri için yinelenmiş ve her durumda %50 delinme gerilimi değerleri saptanmıştır. Bu gerilim türünün kullanılması ile hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 karışımları ile yalıtılmış, alan dağılımı düzgün olmayan pürüzlü ve pürüzsüz elektrot düzenlerinin, yıldırımdan kaynaklanan darbe karakterindeki aşırı gerilimlere karşı davranışını ve bu davranışta aşırı gerilimin kutbiyetinin etkisini görme olanağı elde edilmiştir.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI

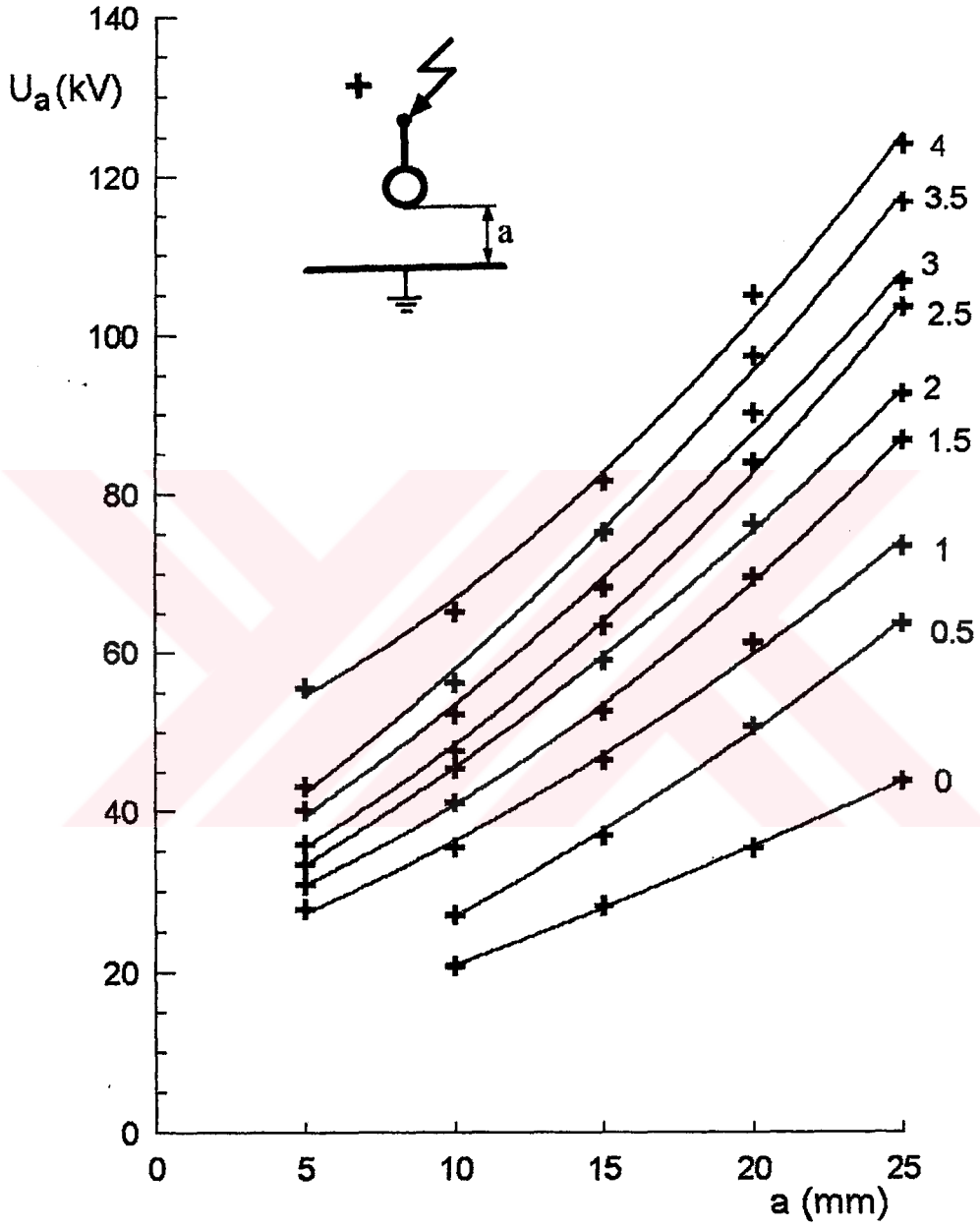
Bu bölümde, pozitif ve negatif kutbiyetli standart darbe gerilimlerinde küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazlarının, deneysel olarak elde edilen delinme gerilimlerinin basınç, elektrot açıklığı ve SF₆+N₂ gaz karışımındaki SF₆ gazı oranı ile değişimleri eğriler biçiminde verilmiştir.

5.1. Farklı Basınlarda Darbe Delinme Geriliminin Elektrot Açıklığı ile Değişimi

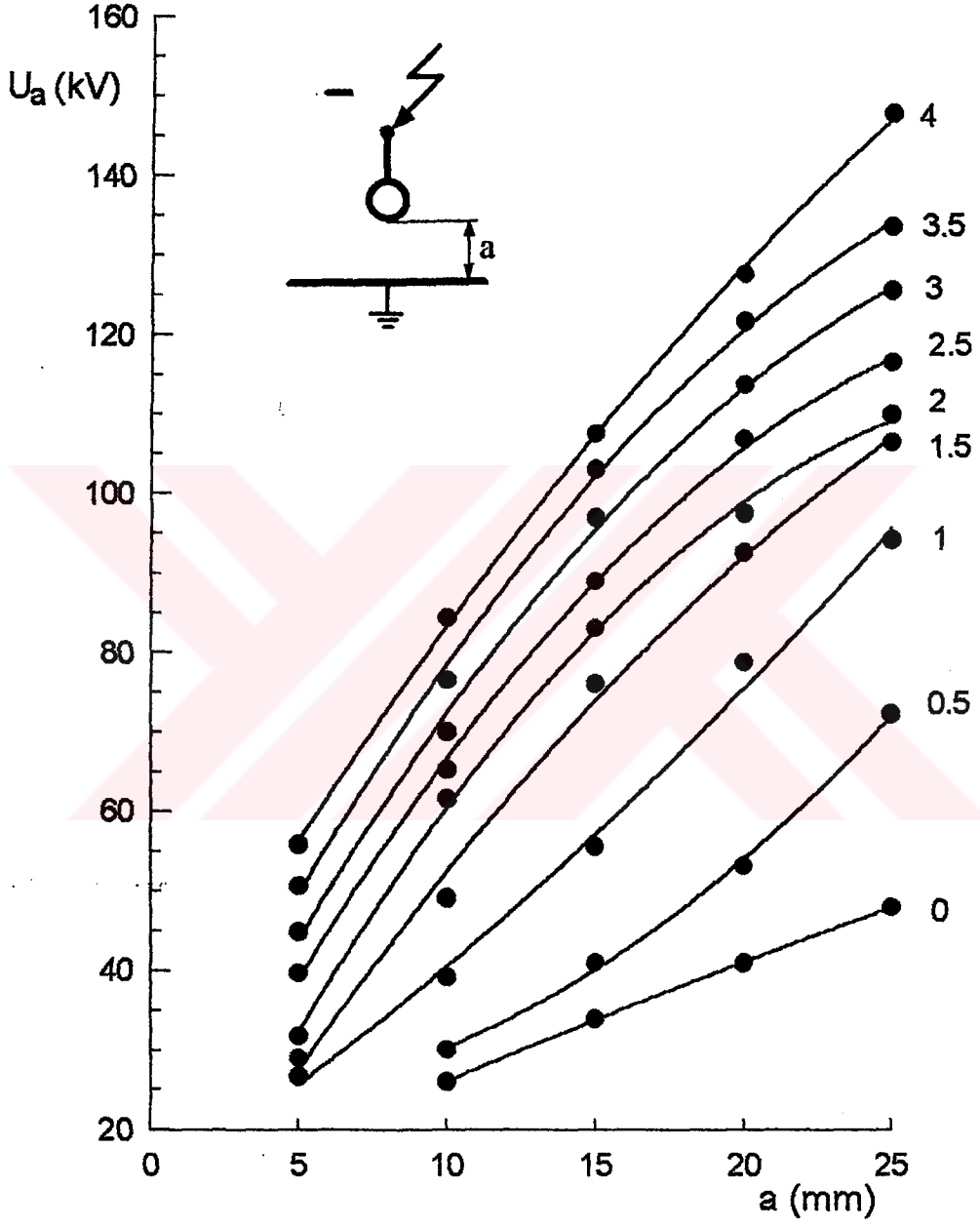
Bundan sonraki alt bölümlerde deney sonuçları verilirken basınç parametre-elektrot açıklığı değişken, elektrot açıklığı parametre-basınç değişken, elektrot açıklığı parametre-gaz oranı değişken ve basınç parametre-gaz oranı değişken alınmıştır. Deney sonuçlarının bu biçimde verilmesinden, sonuçların kolay yorumlanması ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu alt bölümde basıncın 0-4 bar aralığındaki sabit değerlerinde elektrot açıklığının 5-25 mm arasında değişimi ile delinme gerilimi değerleri gösterilmiştir. Deney sonuçları, hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için ayrı ayrı verilmiştir.

5.1.1. Hava için $U_a = f(a)$ eğrileri

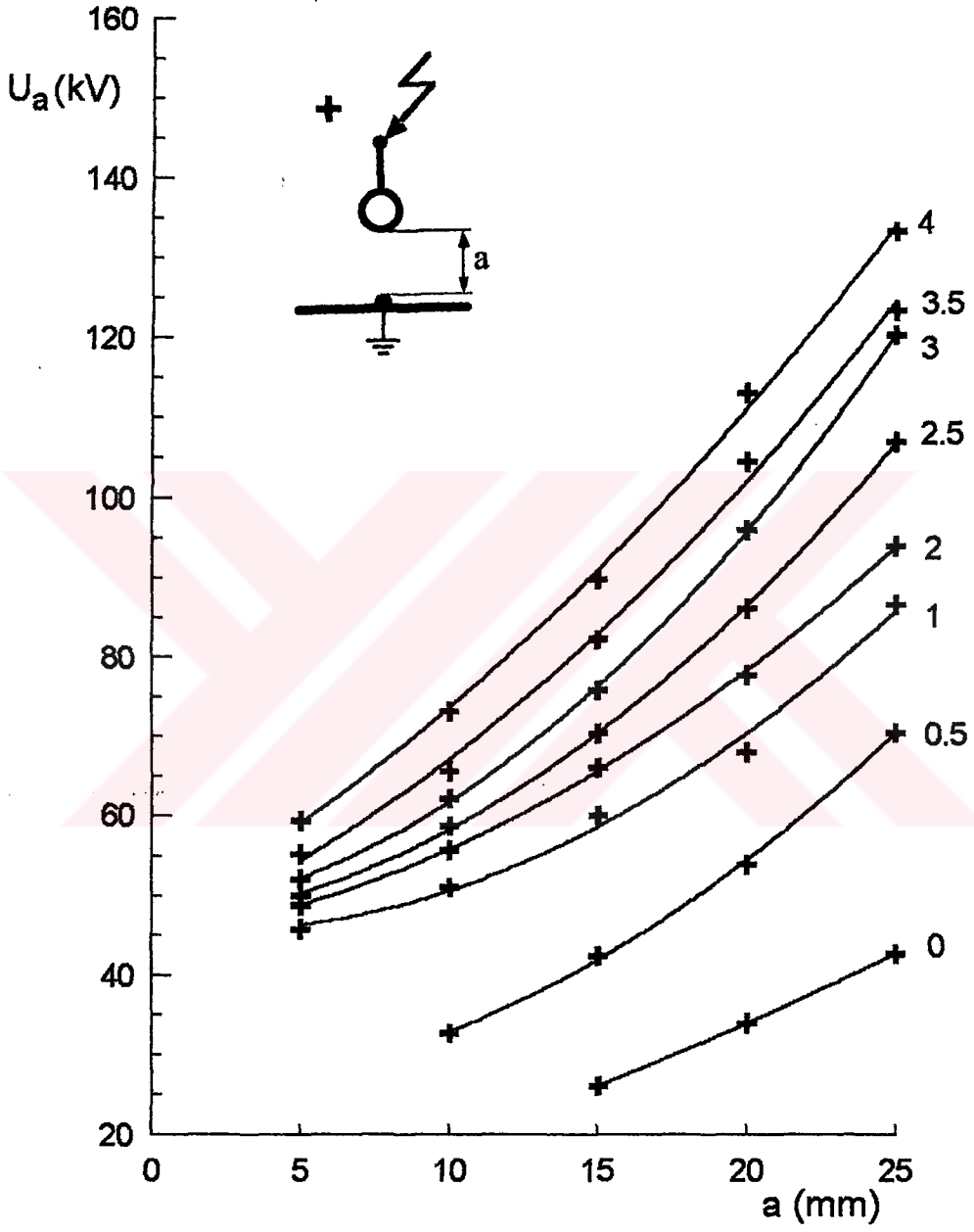
Şekil 5.1-5.4'te hava için sabit basınçta, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimleri gösterilmiştir.



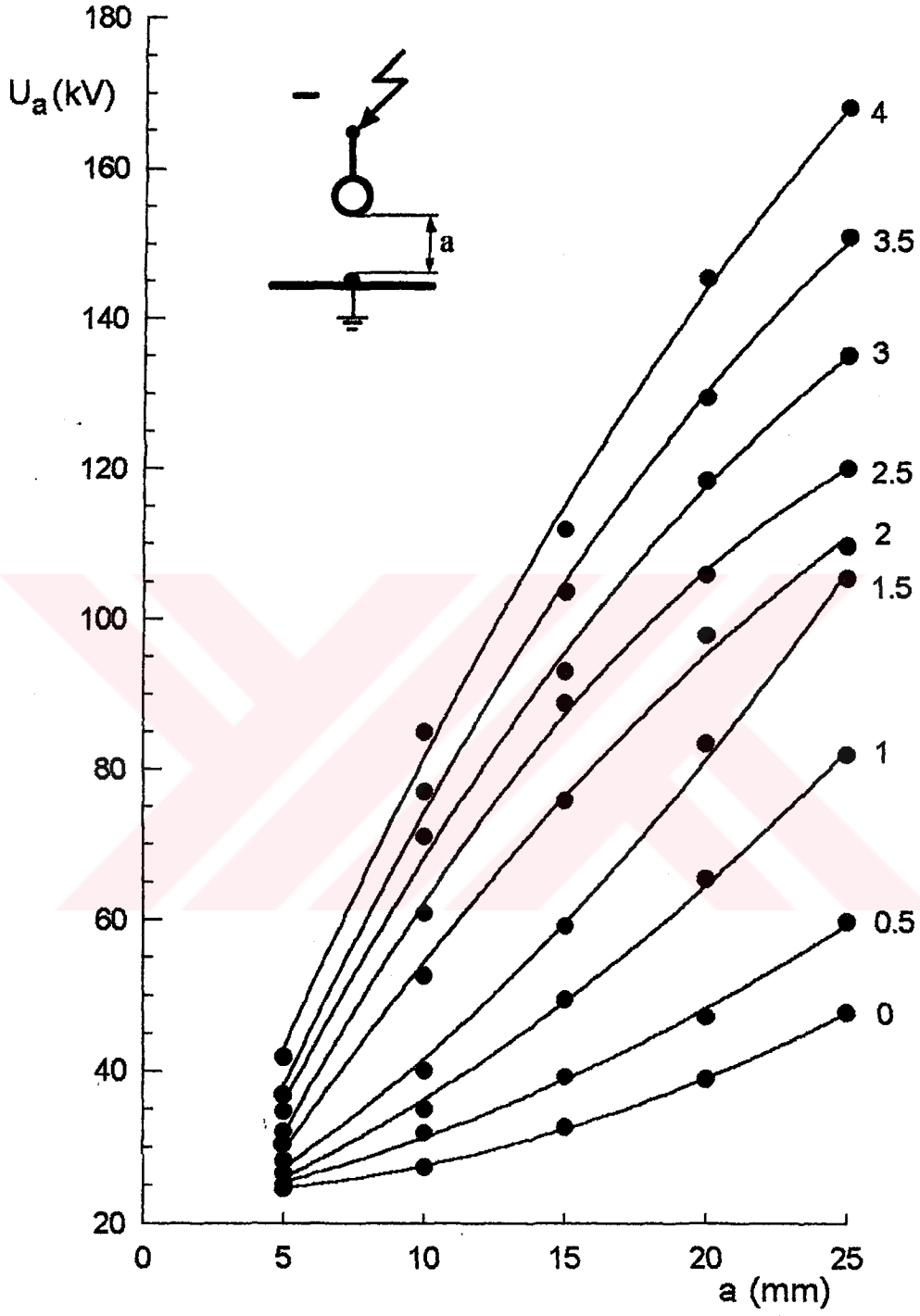
Şekil 5.1. Havada, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



Şekil 5.2. Havada, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



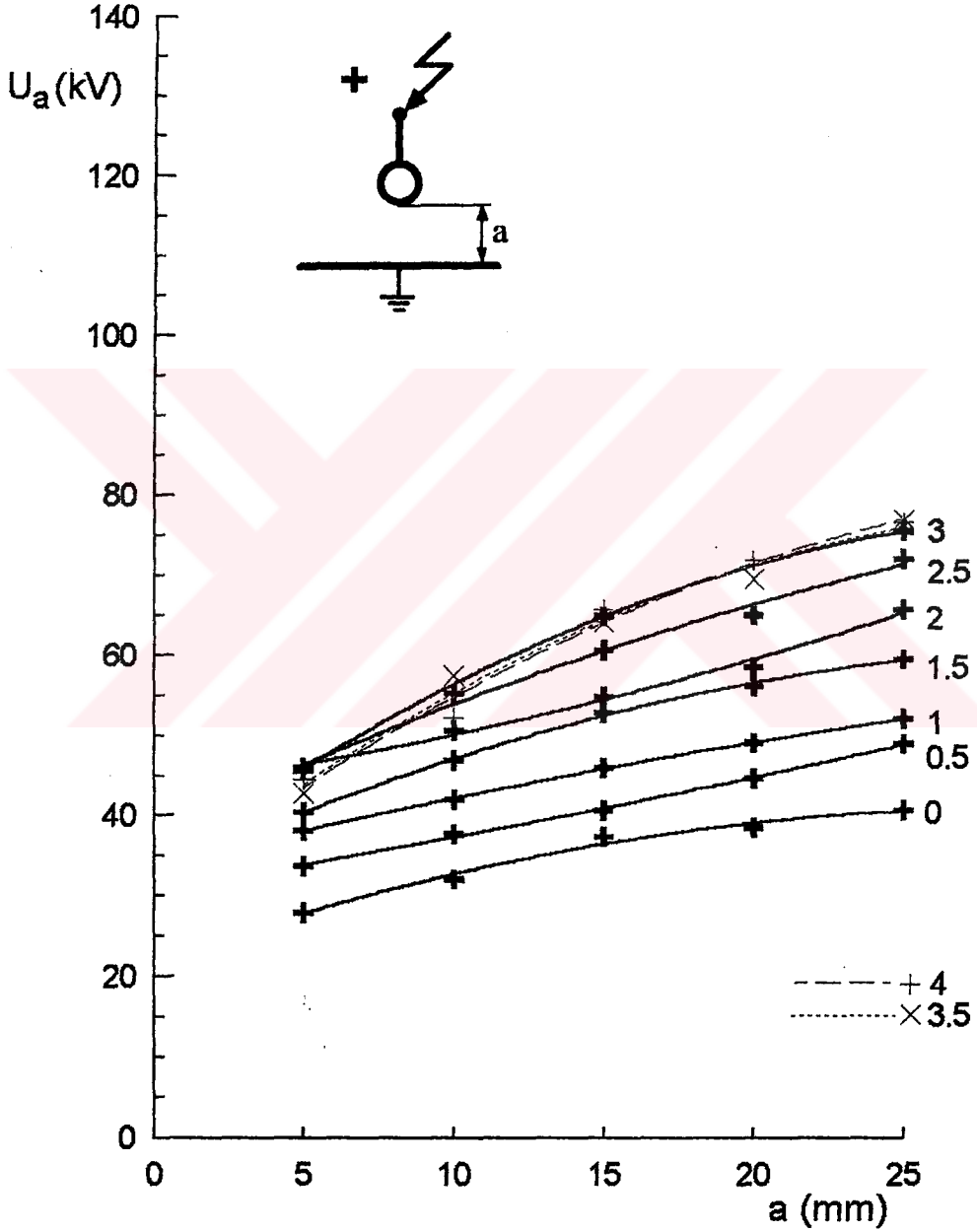
Şekil 5.3. Havada, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



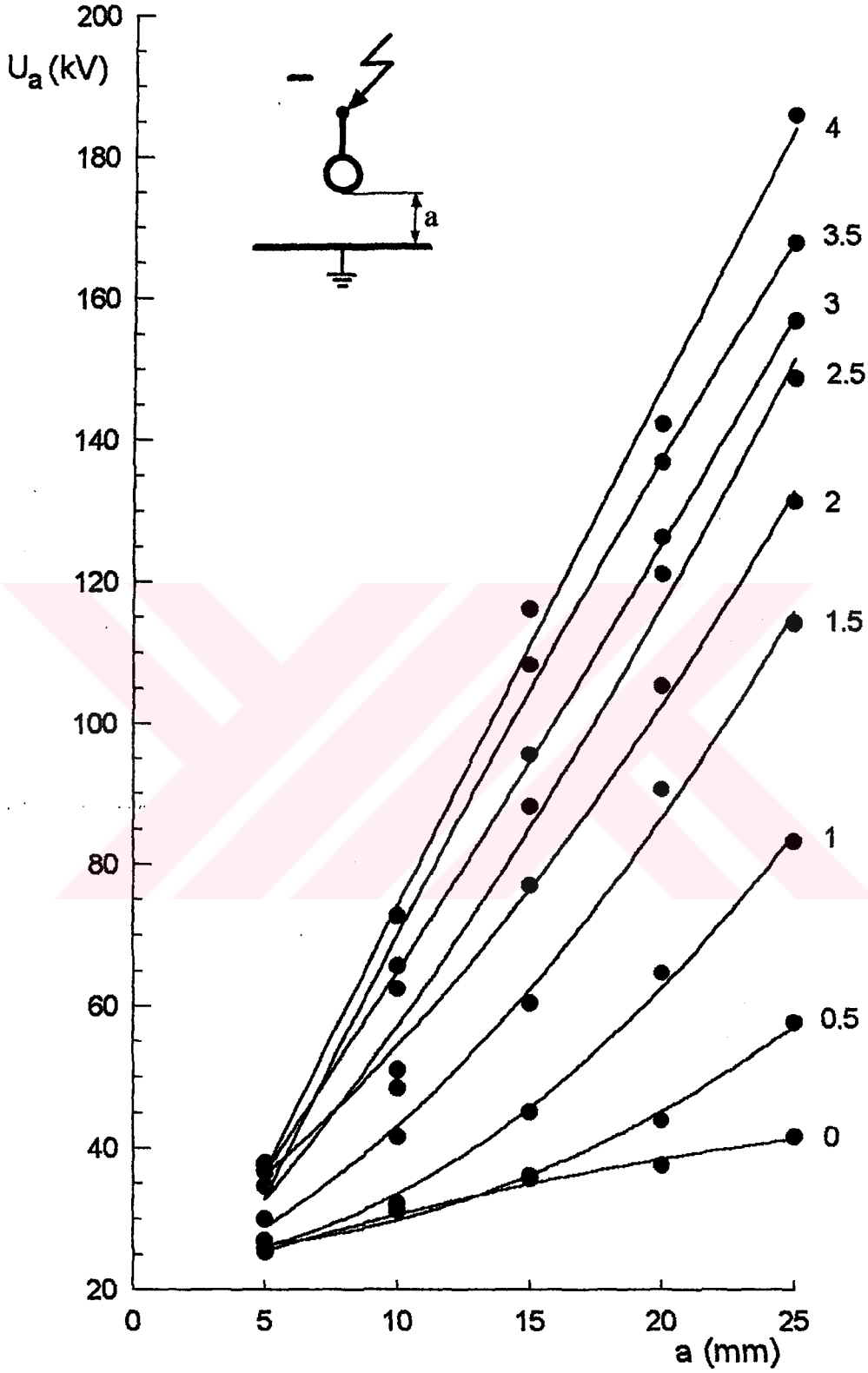
Şekil 5.4. Havada, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.1.2. N₂ için $U_a = f(a)$ eğrileri

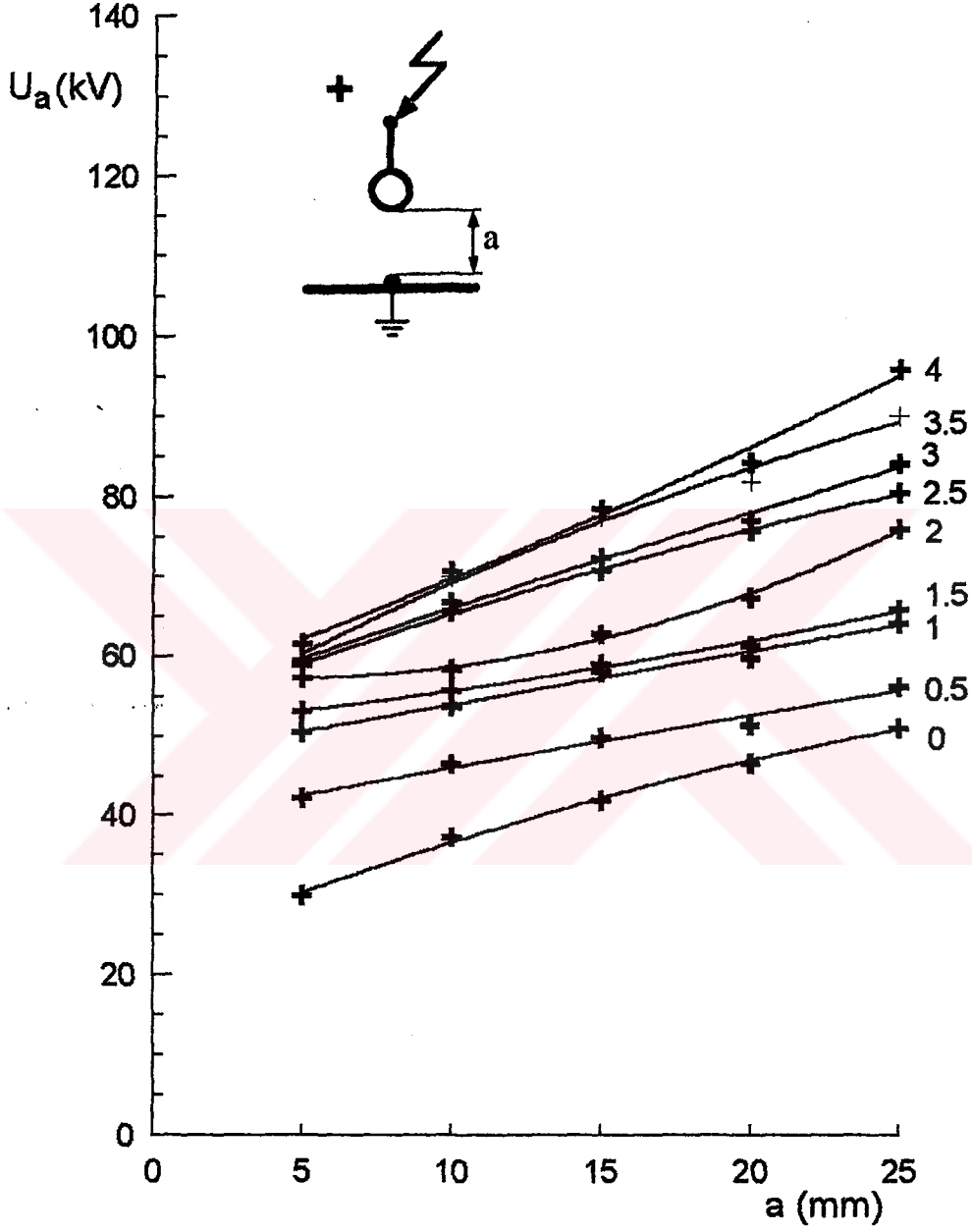
Şekil 5.5-5.8'de N₂ için sabit basınçta, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimleri gösterilmiştir.



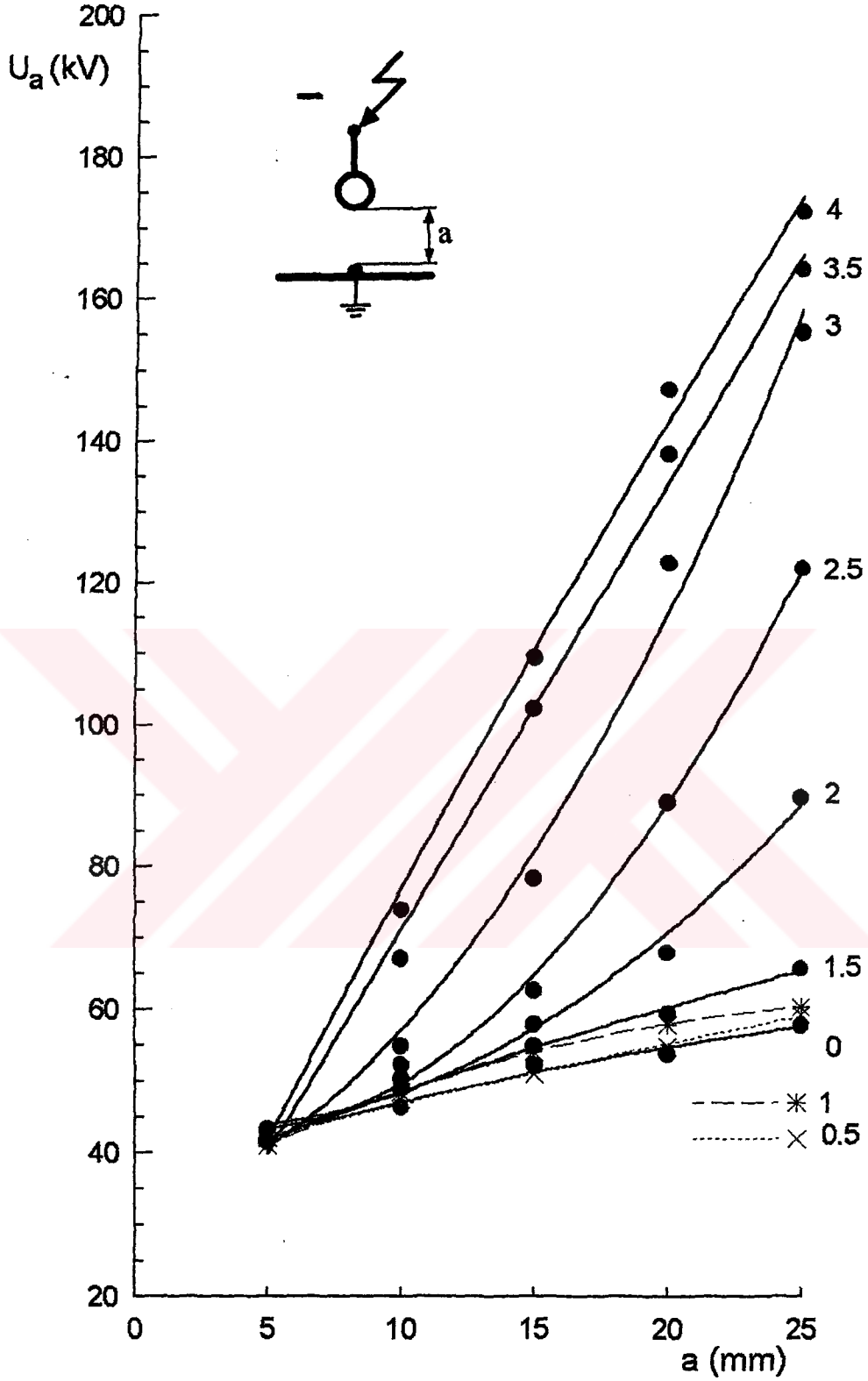
Şekil 5.5. N₂ gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



Şekil 5.6. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



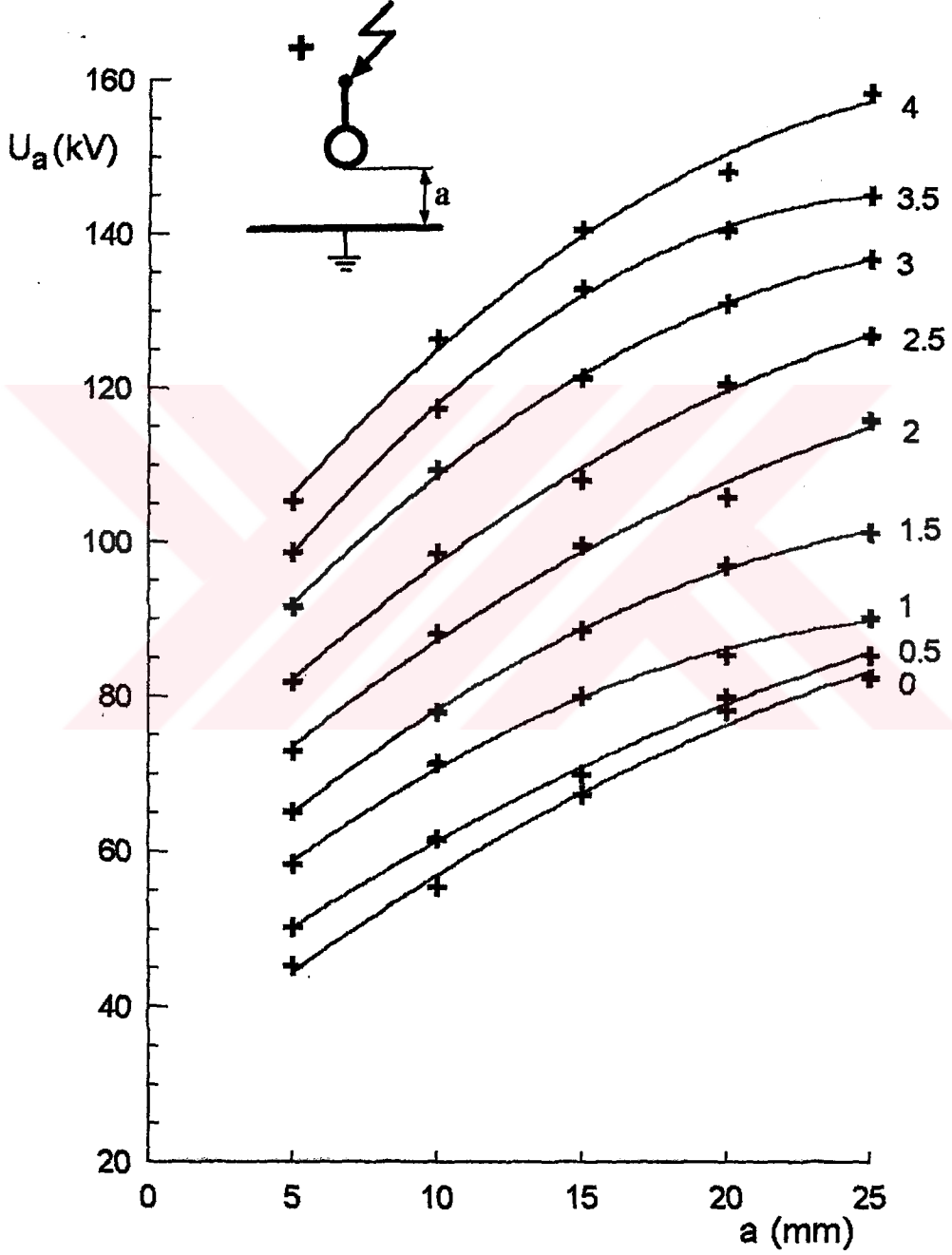
Şekil 5.7. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



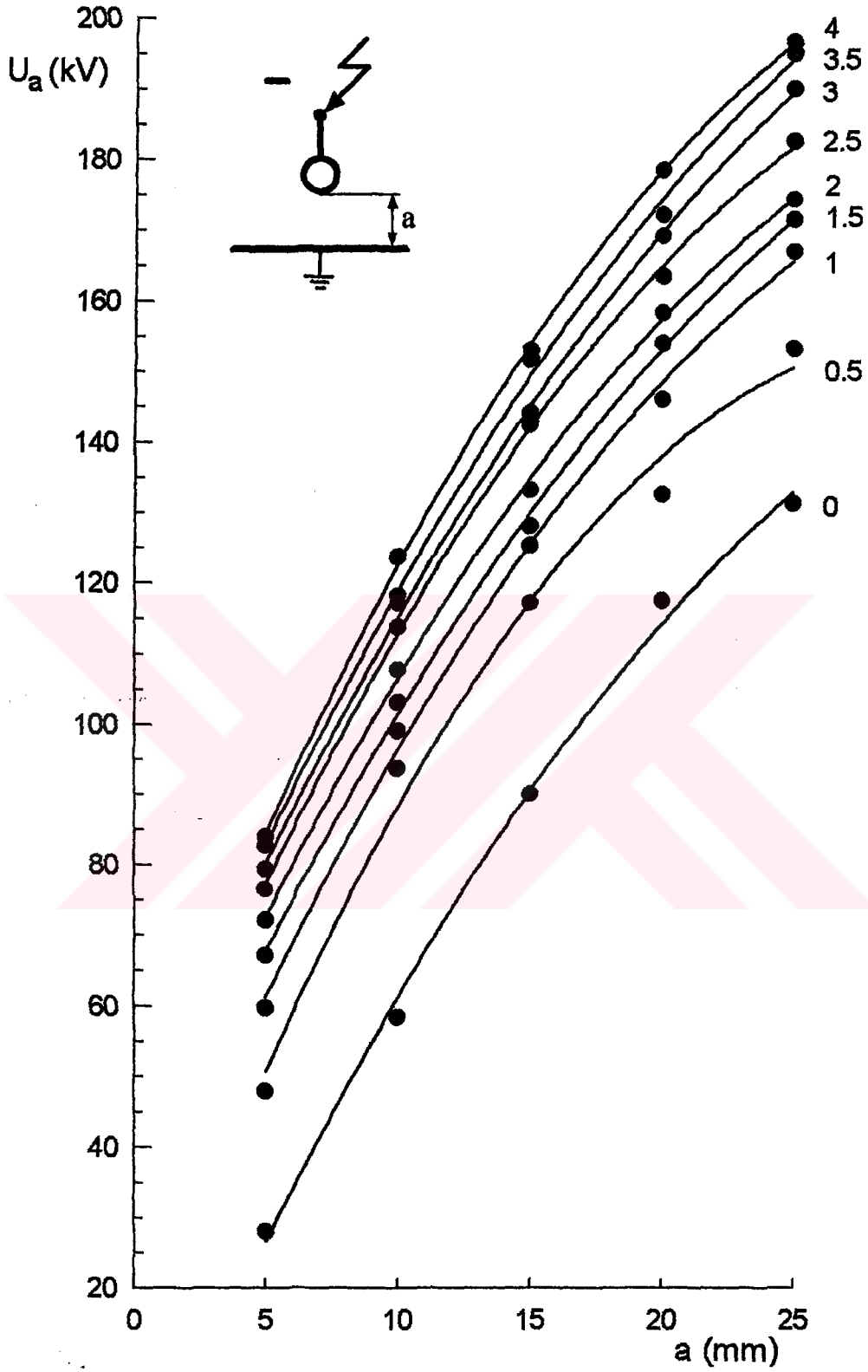
Şekil 5.8. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.1.3. SF₆ için $U_a = f(a)$ eğrileri

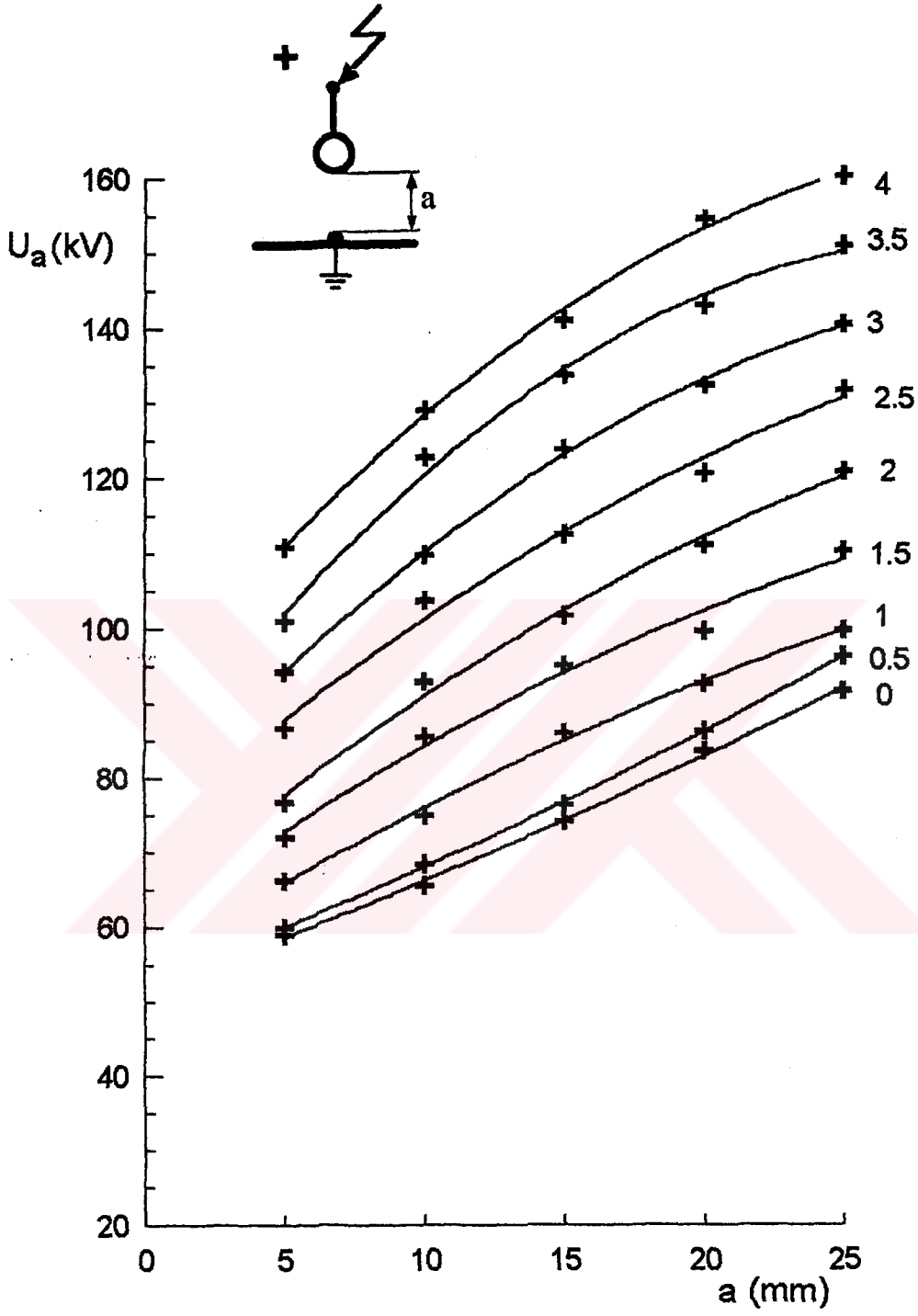
Şekil 5.9-5.12'de SF₆ için sabit basınçta, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimleri gösterilmiştir.



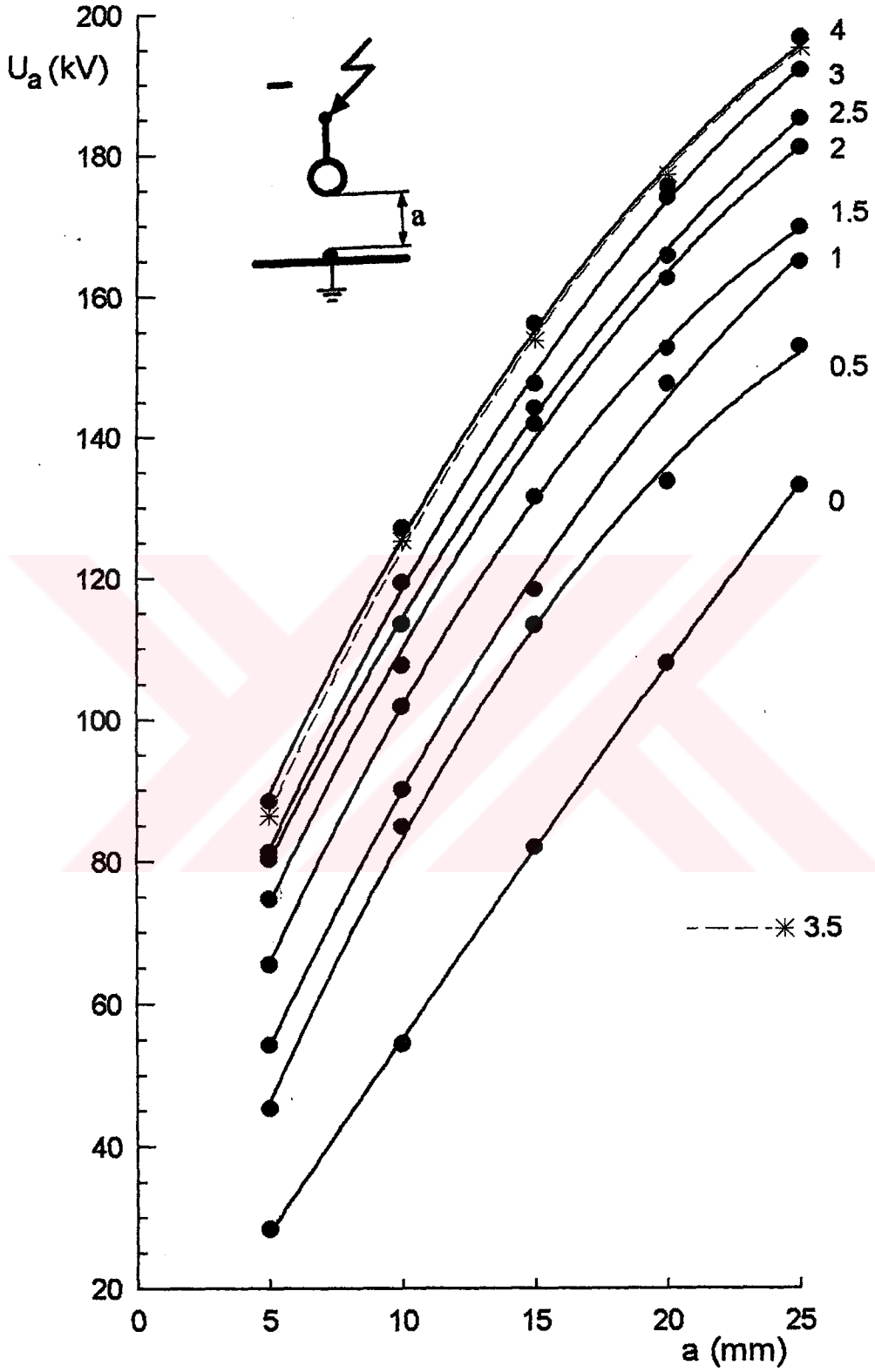
Şekil 5.9. SF₆ gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



Şekil 5.10. SF_6 gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



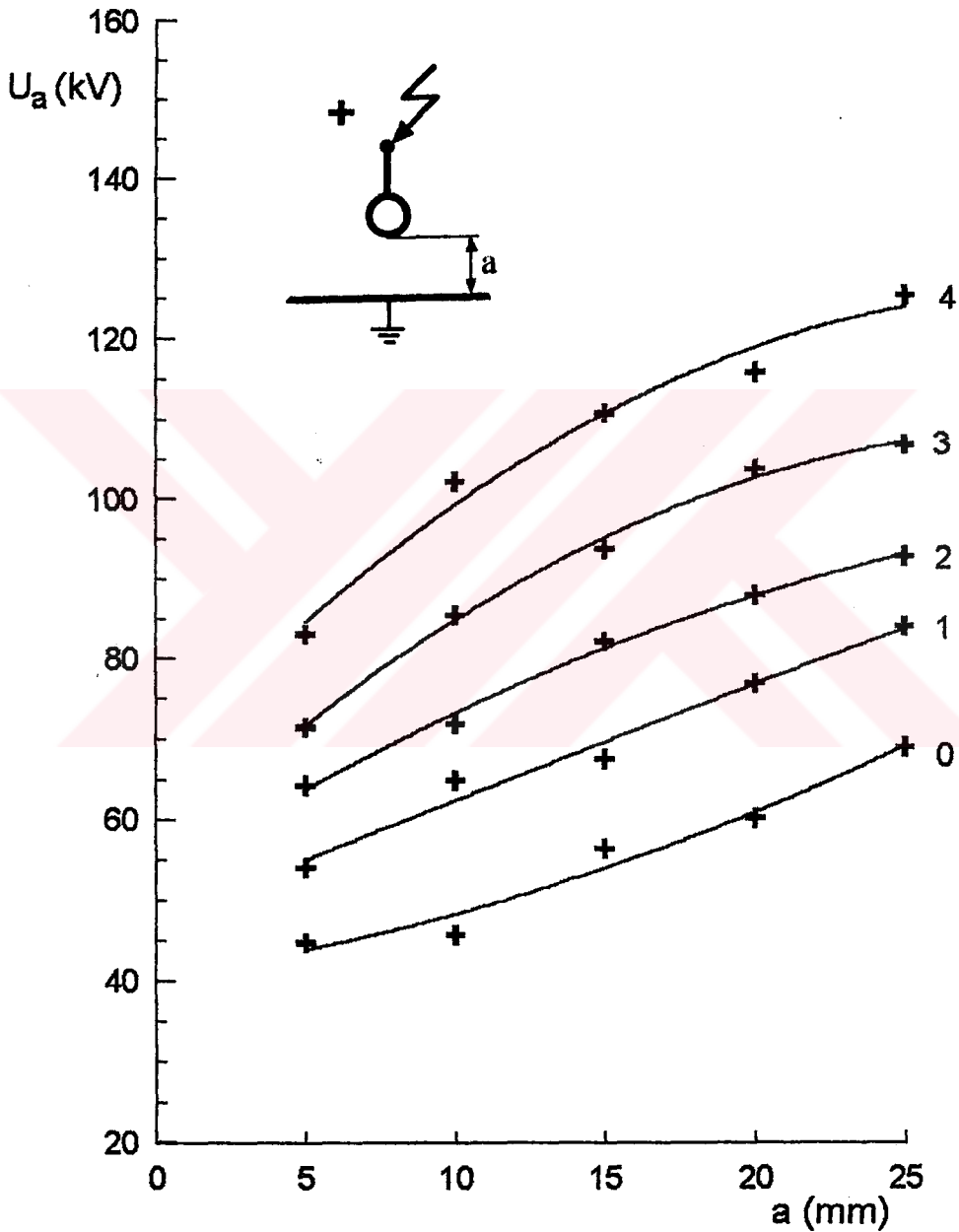
Şekil 5.11. SF_6 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



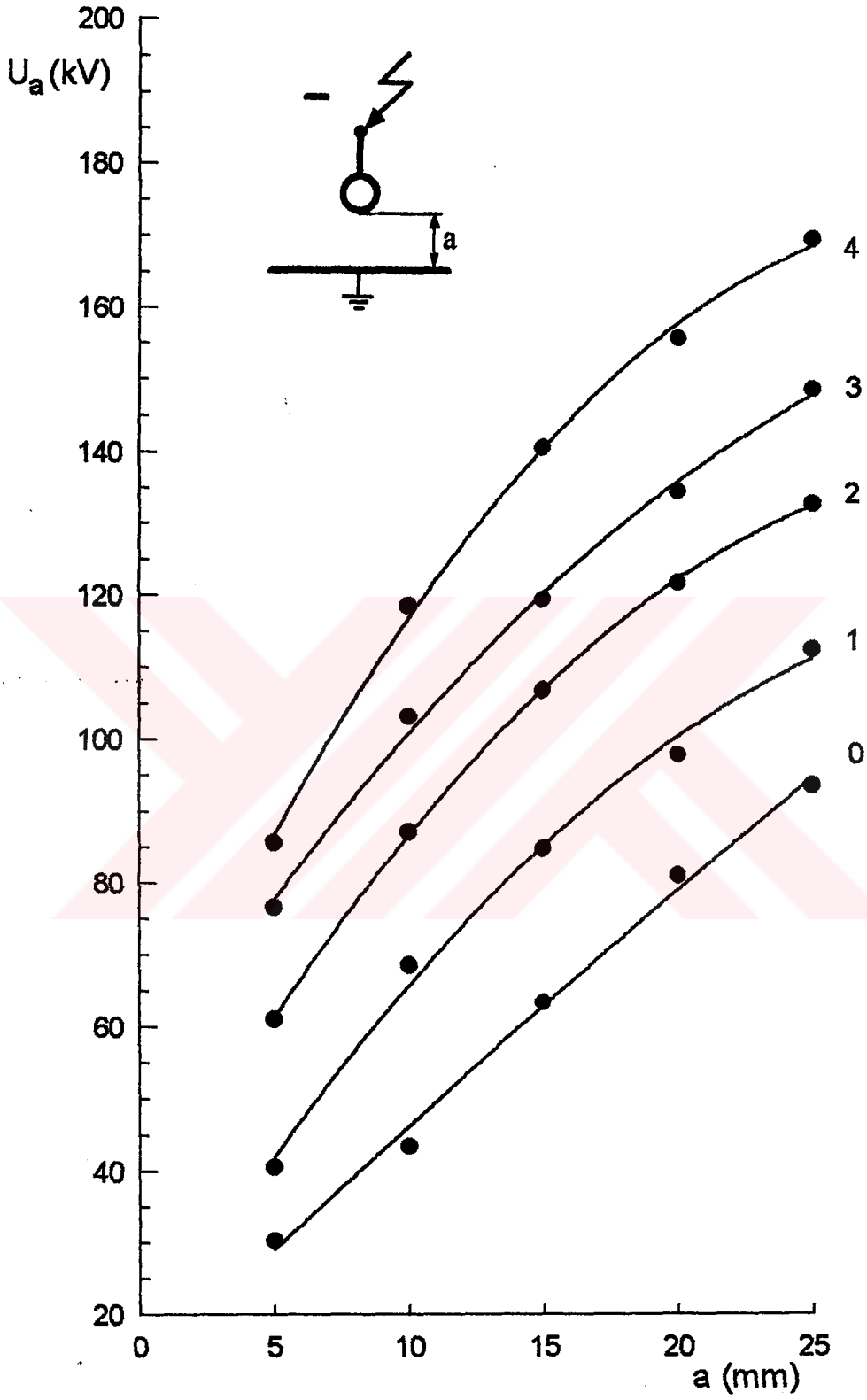
Şekil 5.12. SF_6 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.1.4. $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ için $U_a = f(a)$ eğrileri

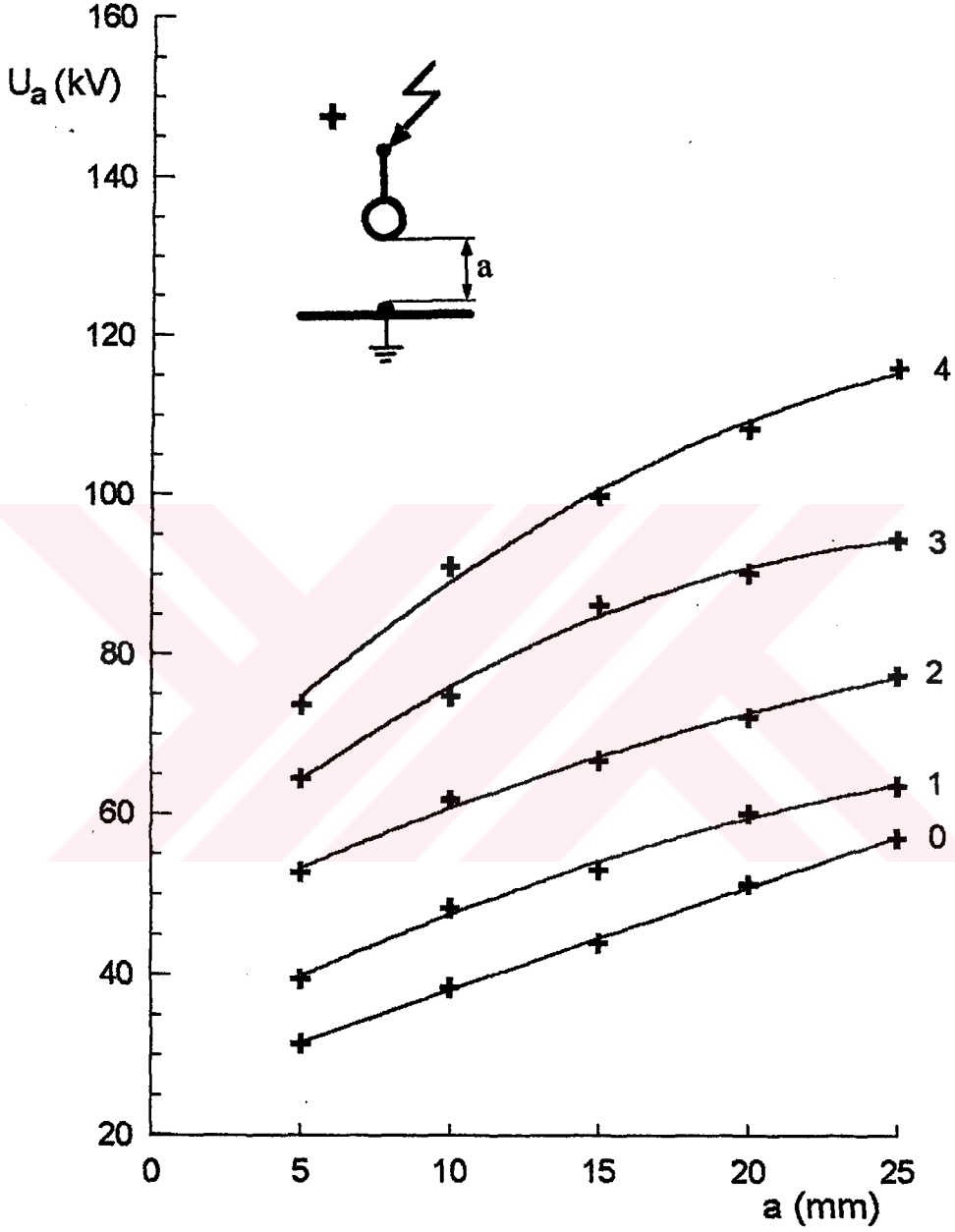
Şekil 5.13-5.16'da %20 SF_6 + %80 N_2 ; şekil 5.17-5.20'de %40 SF_6 + %60 N_2 ; şekil 5.21-5.24'te %60 SF_6 + %40 N_2 ve şekil 5.25-5.28'de %80 SF_6 + %20 N_2 oranlarında gaz karışımları için sabit basınçta, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimleri gösterilmiştir.



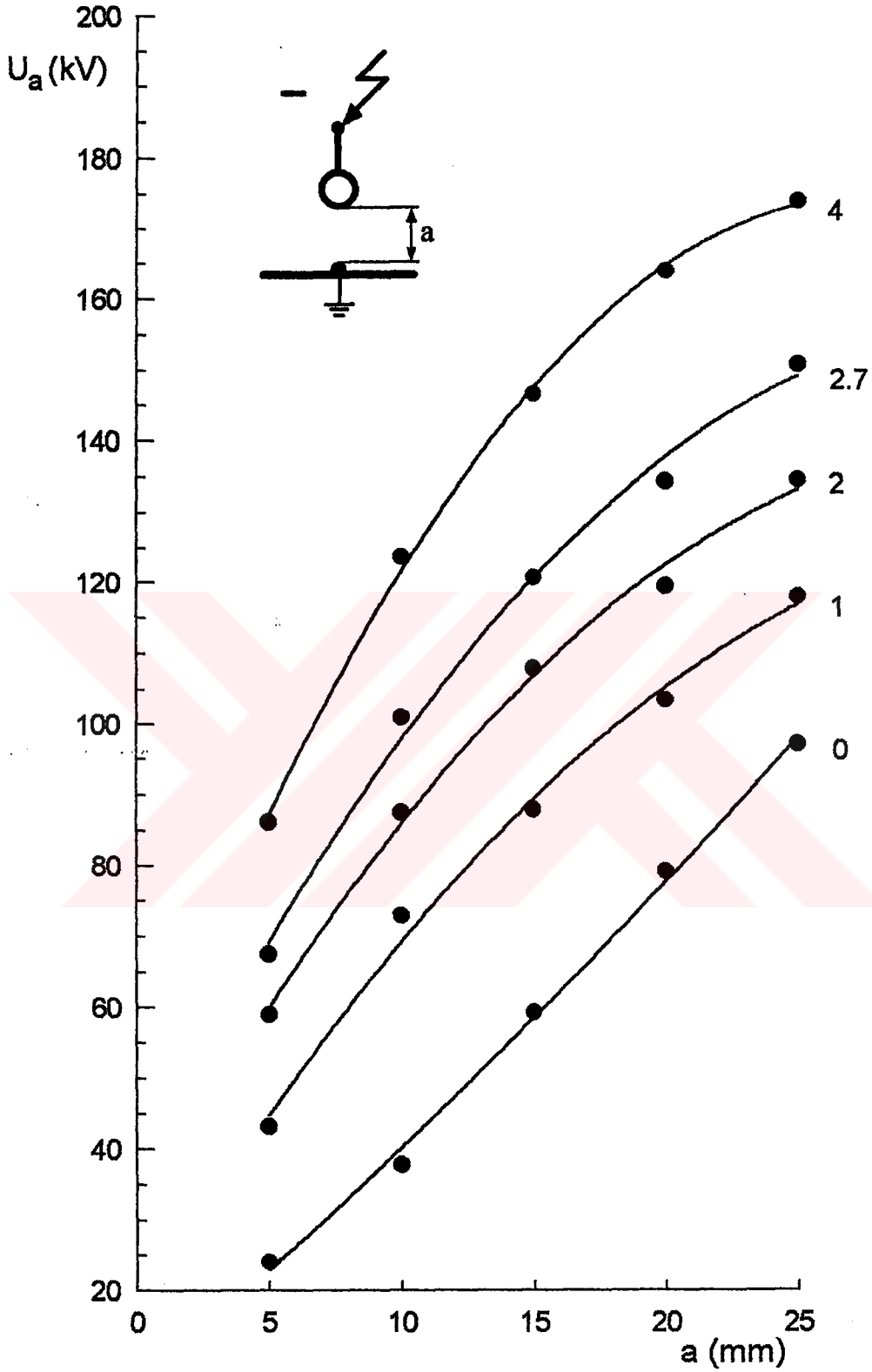
Şekil 5.13. %20 SF_6 + %80 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



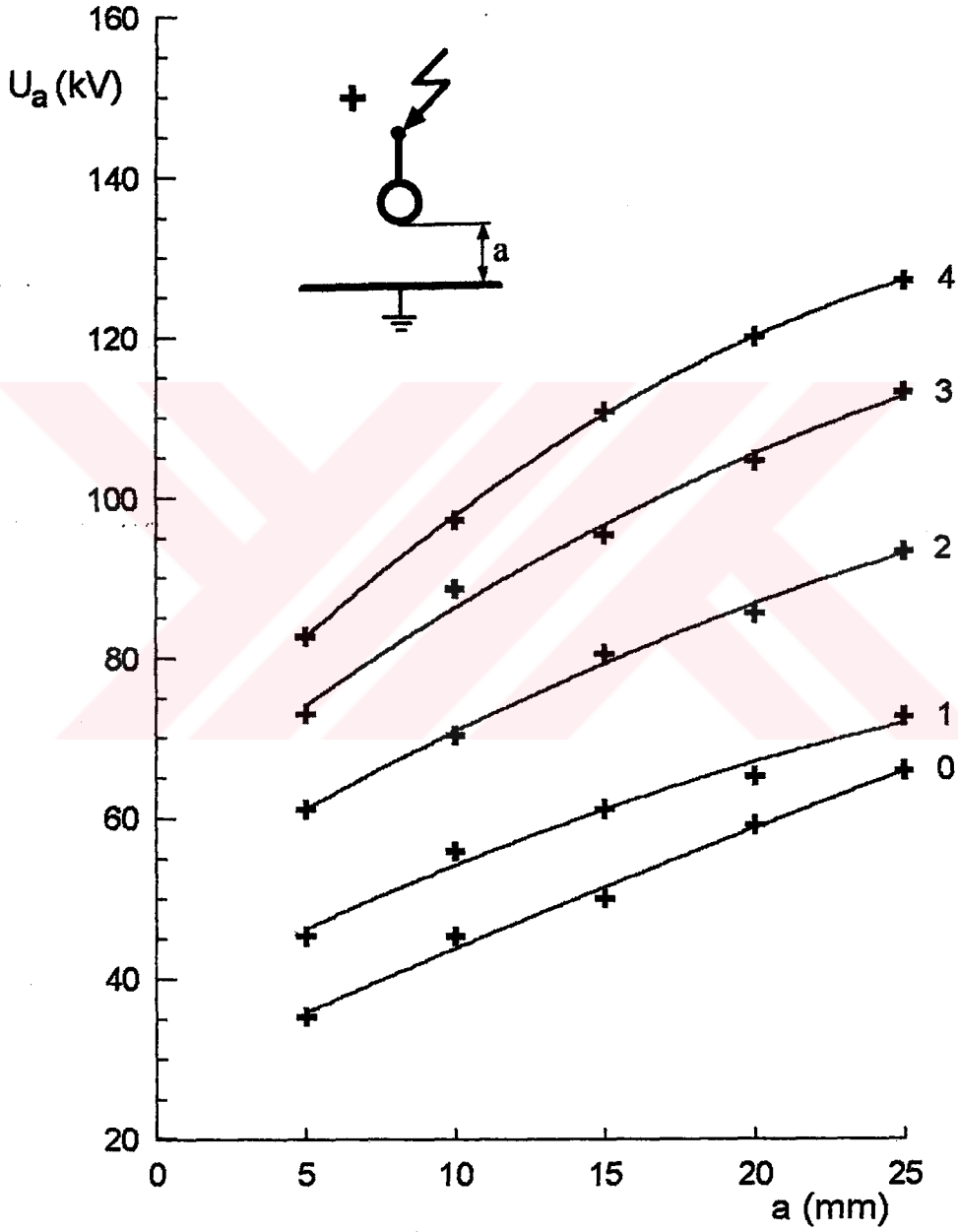
Şekil 5.14. %20 SF₆ + %80 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



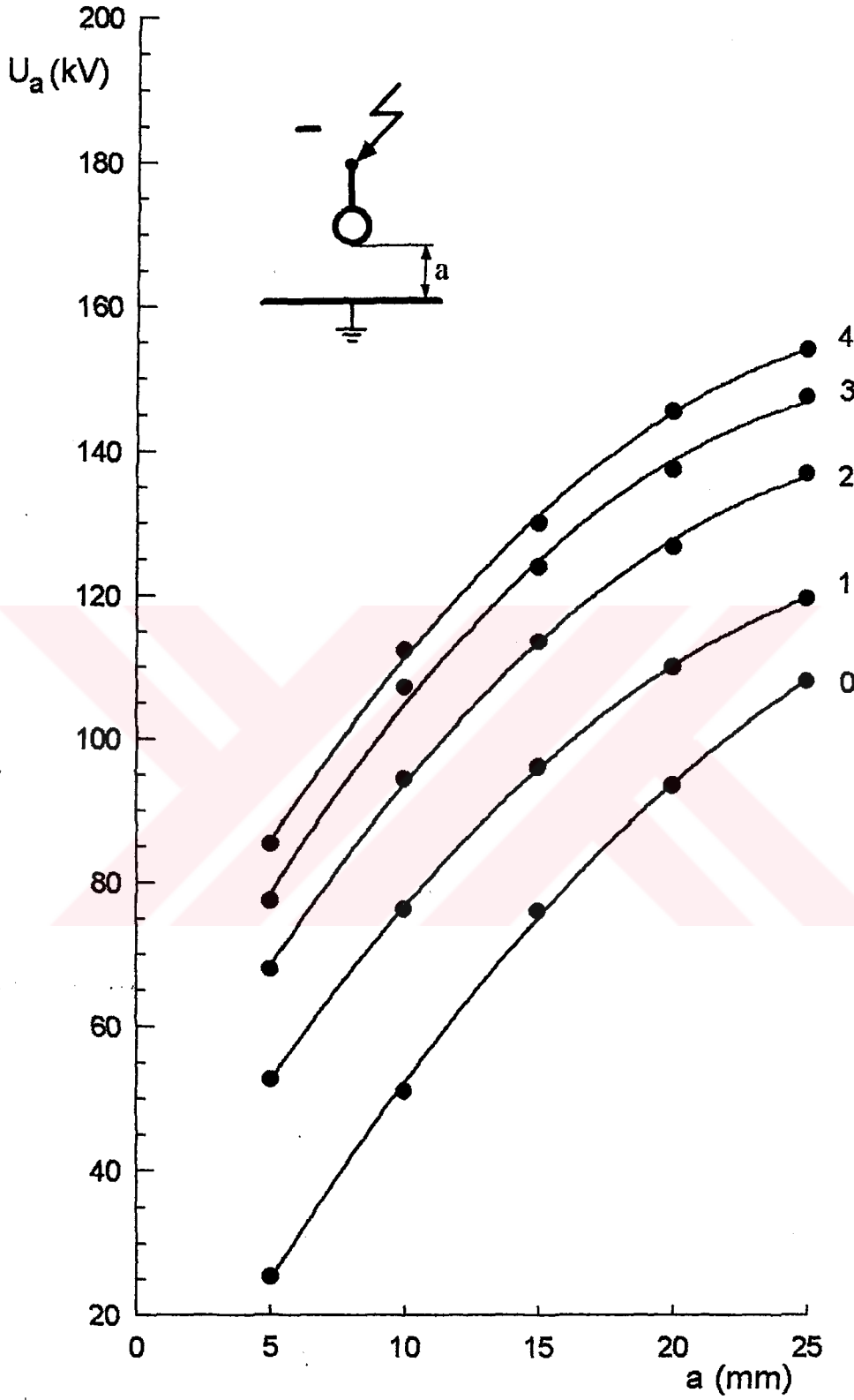
Şekil 5.15. %20 SF₆ + %80 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



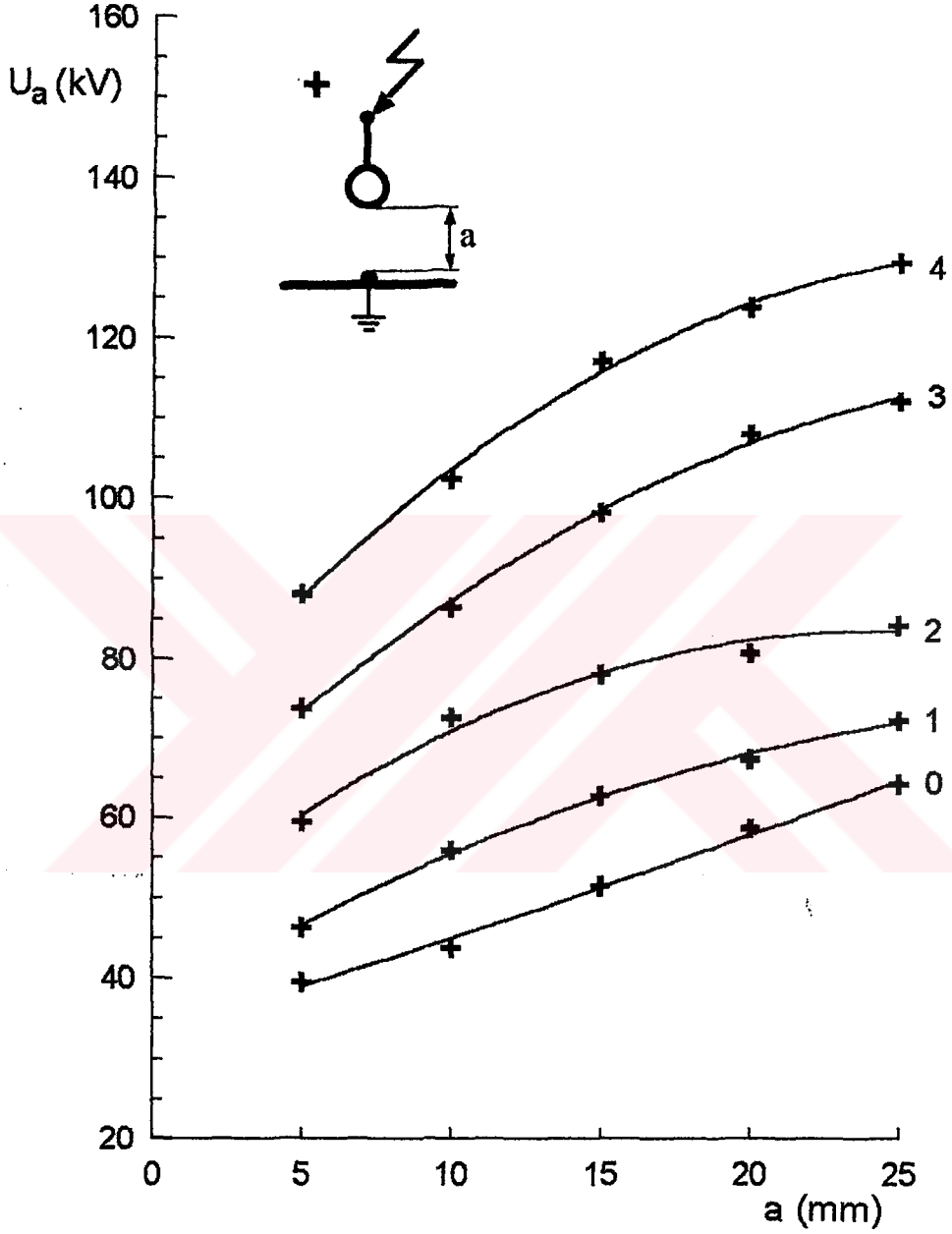
Şekil 5.16. %20 SF₆ + %80 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



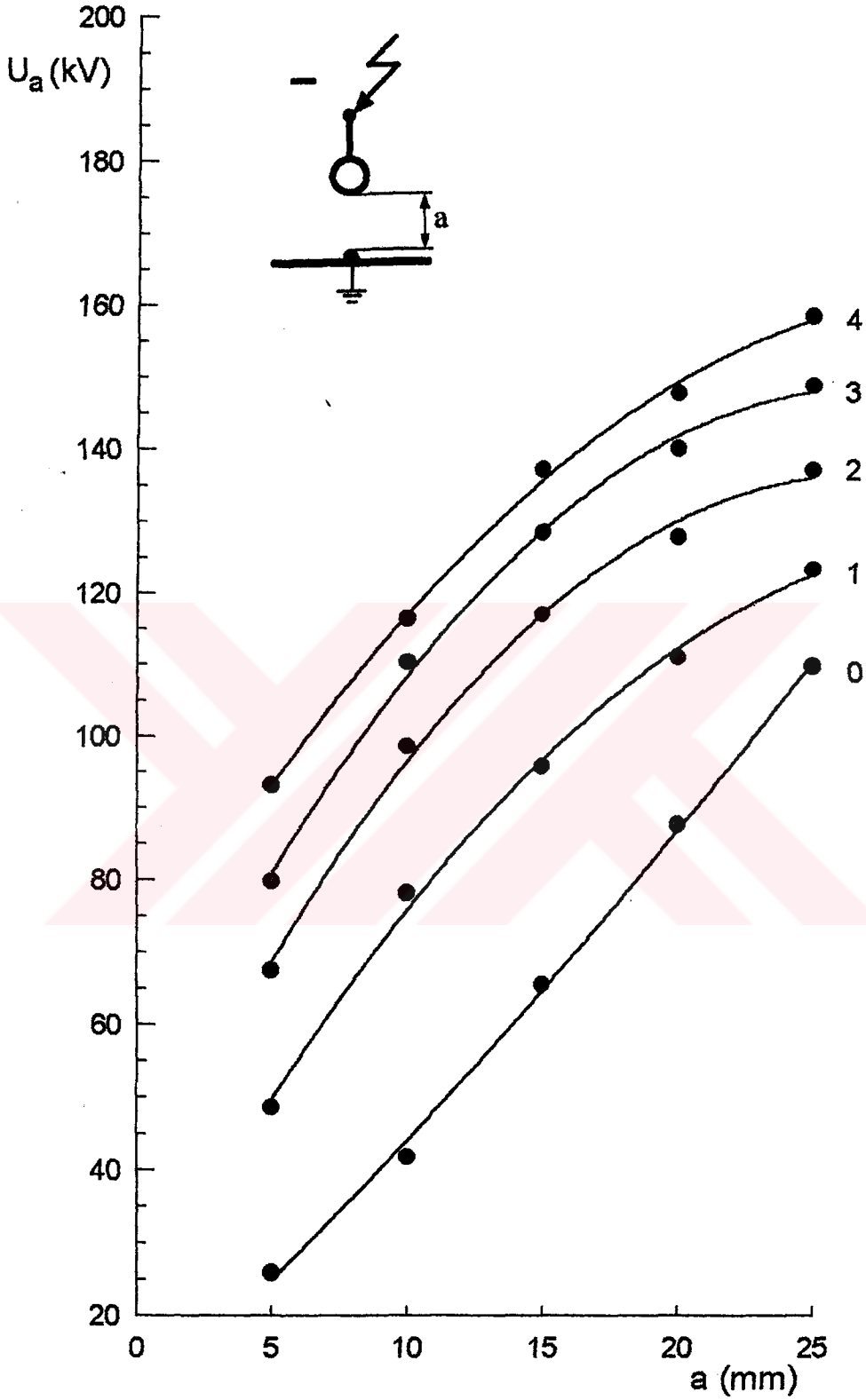
Şekil 5.17. %40 SF₆ + %60 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



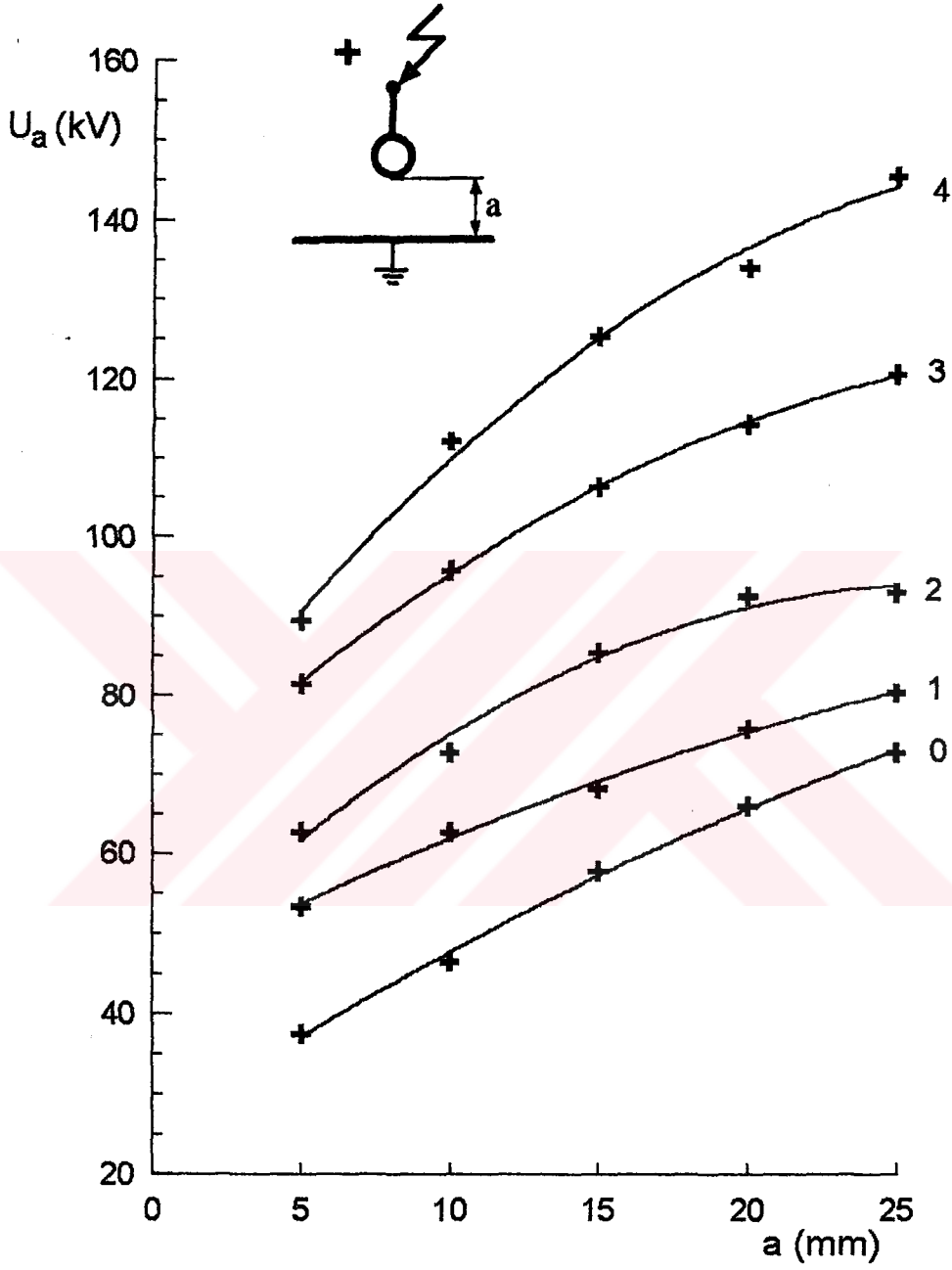
Şekil 5.18. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



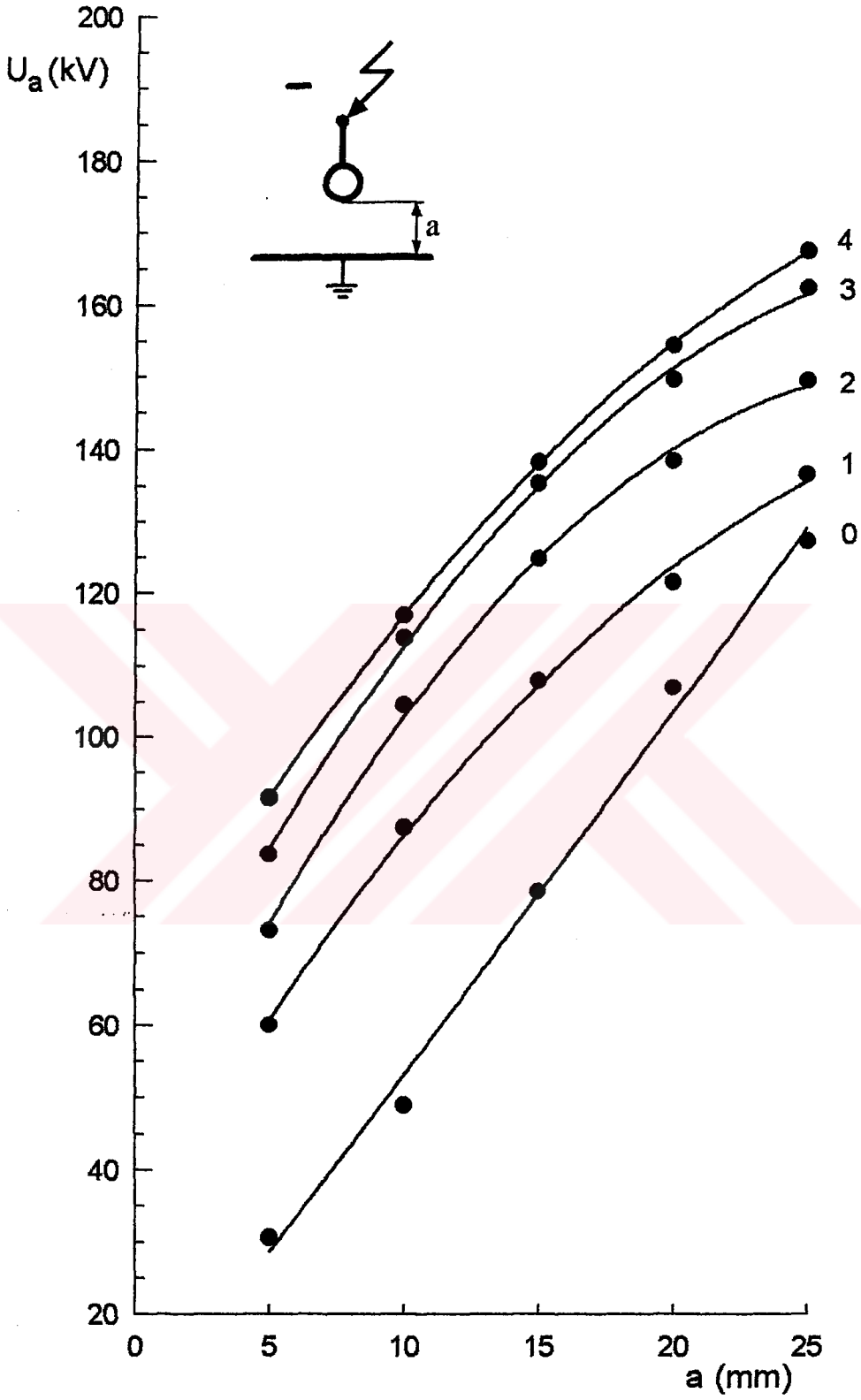
Şekil 5.19. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



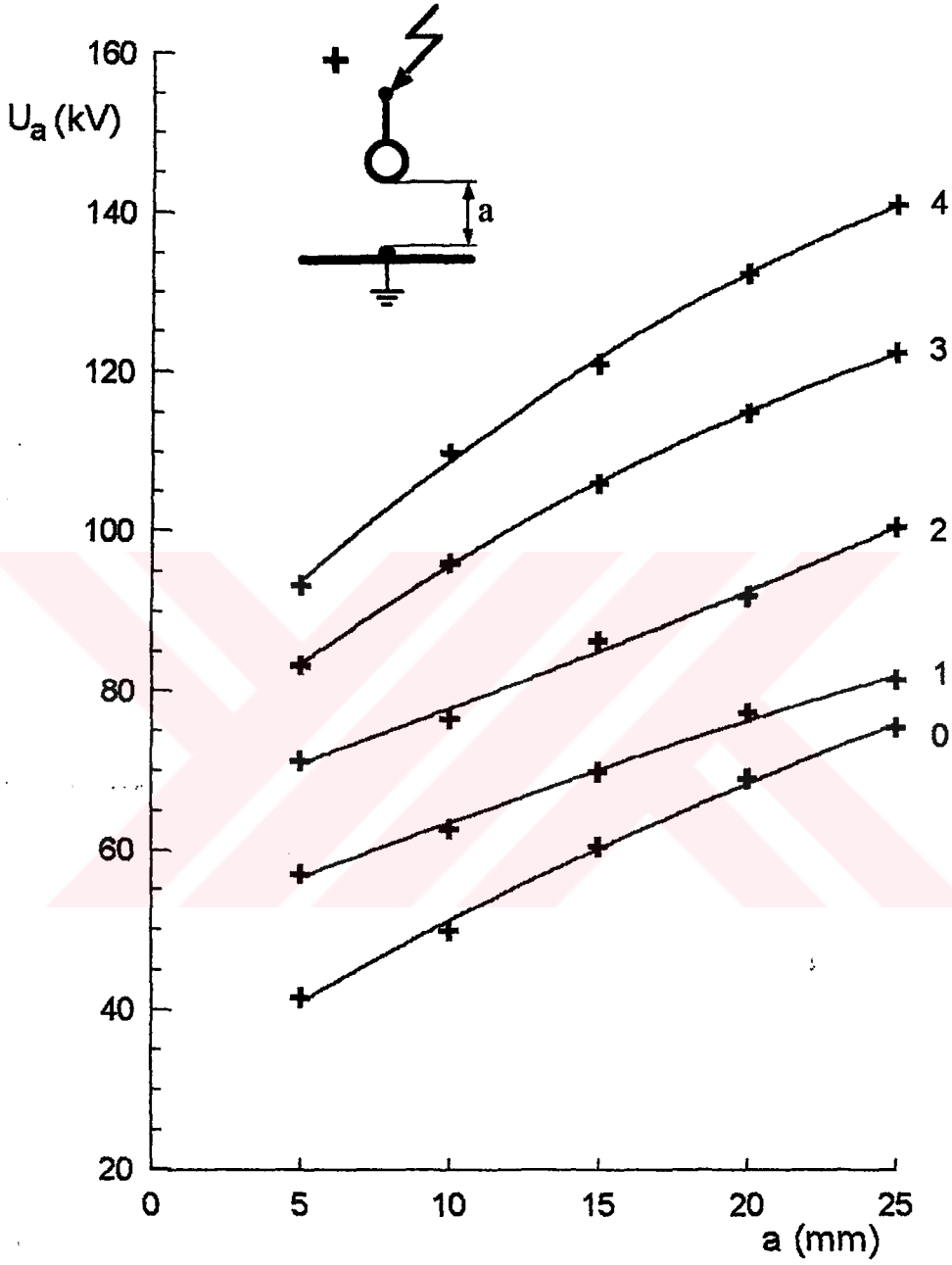
Şekil 5.20. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



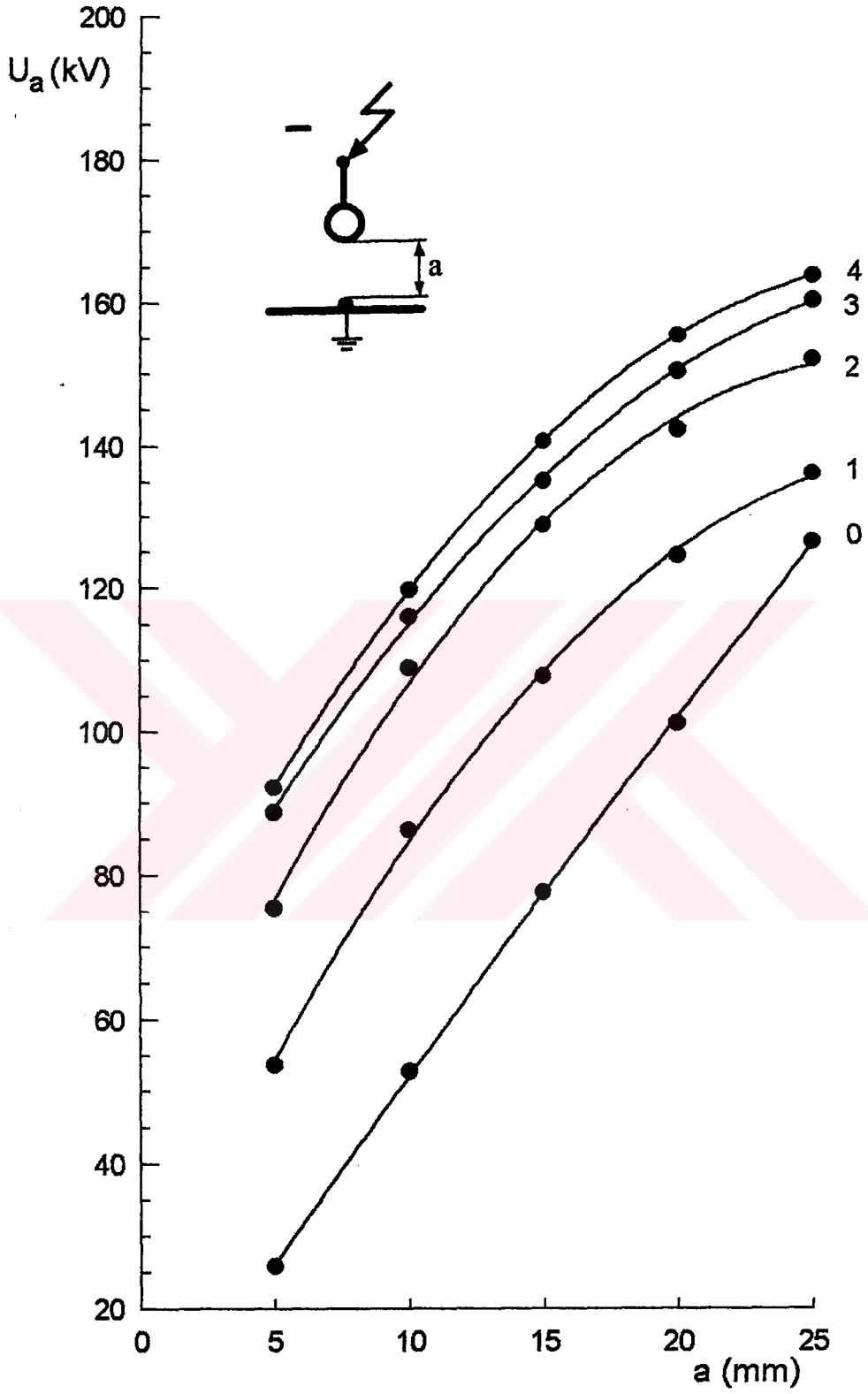
Şekil 5.21. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



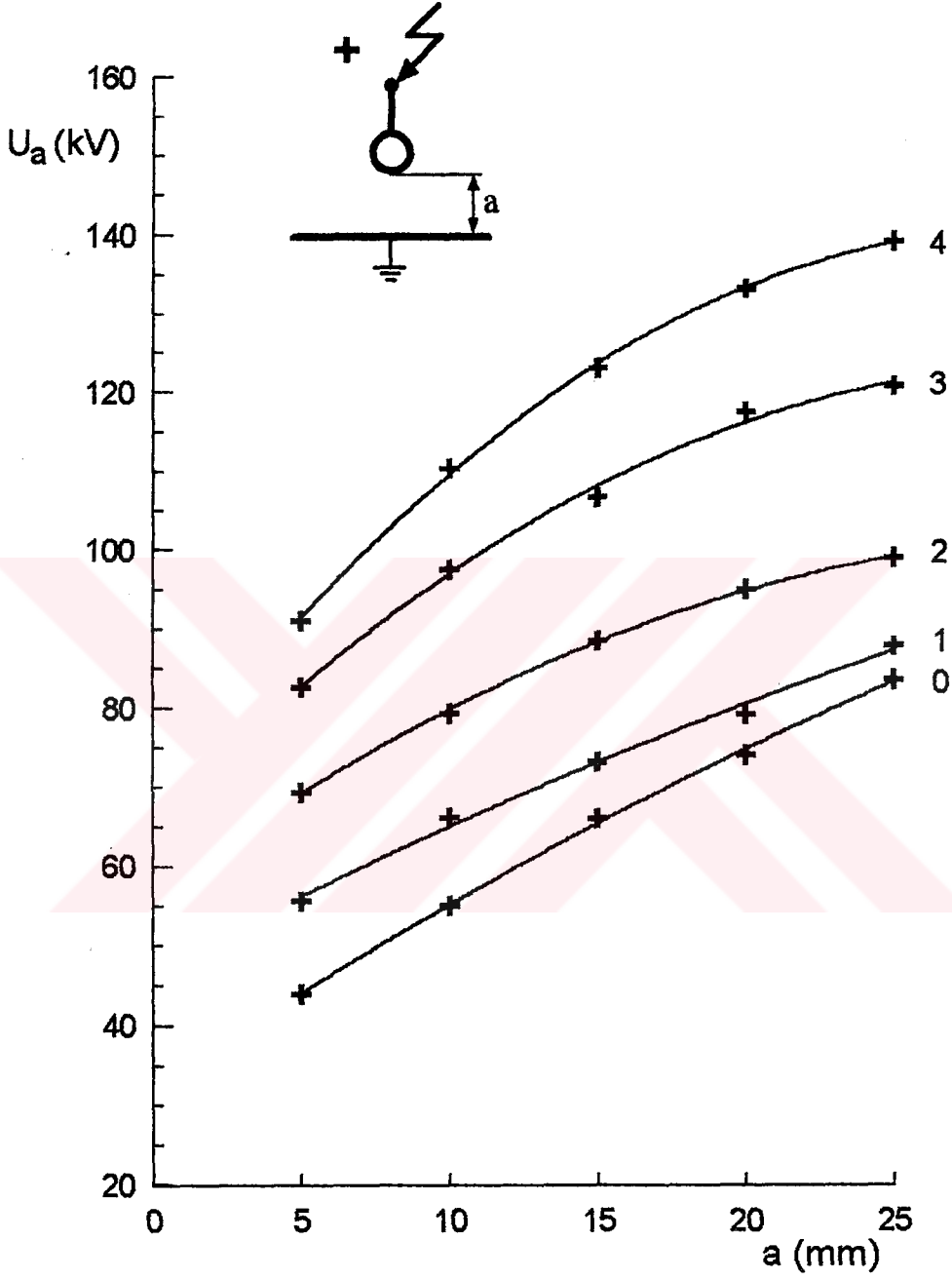
Şekil 5.22. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



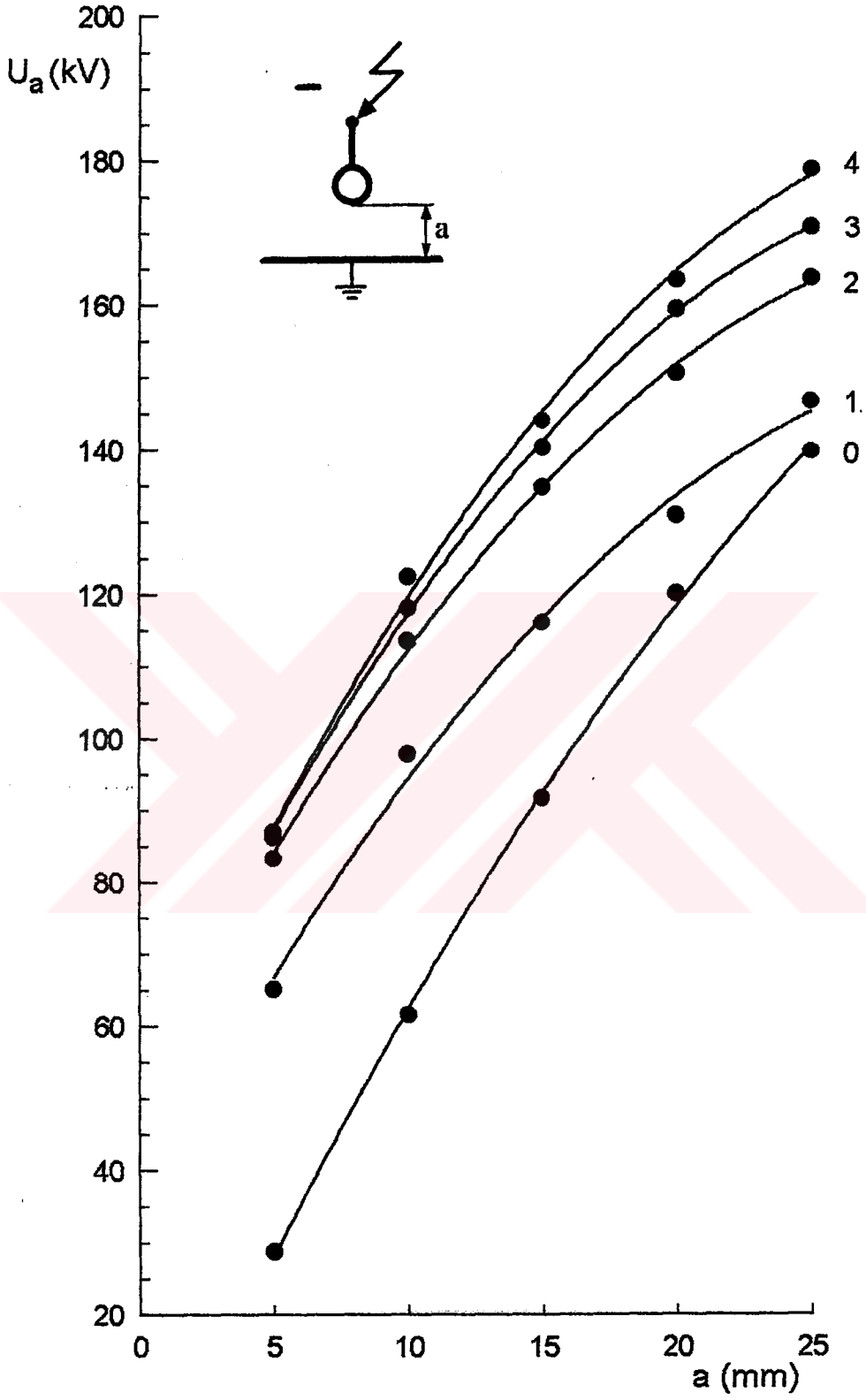
Şekil 5.23. %60 SF₆ + %40 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



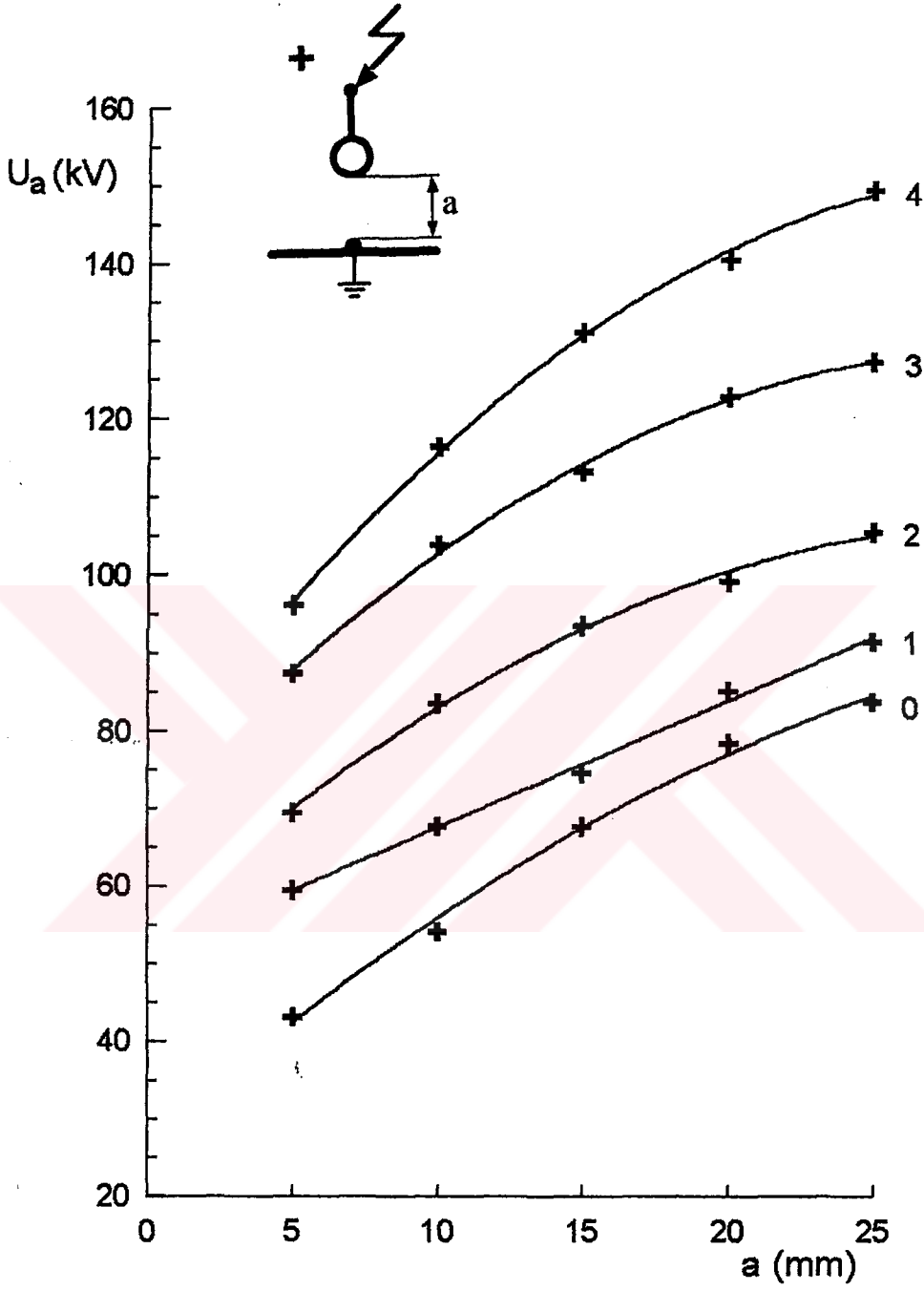
Şekil 5.24. %60 SF₆ + %40 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



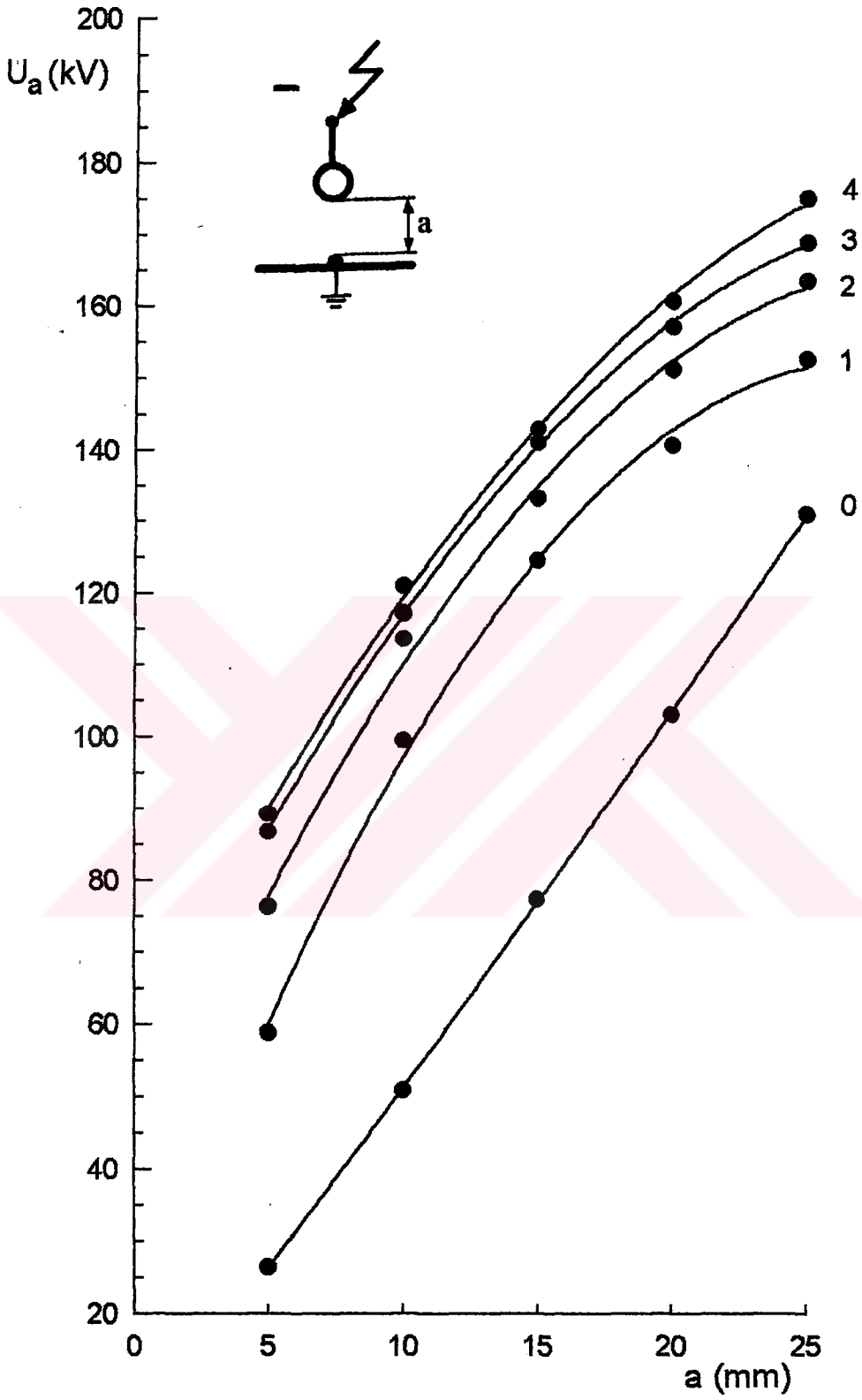
Şekil 5.25. %80 SF₆ + %20 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



Şekil 5.26. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.



Şekil 5.27. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



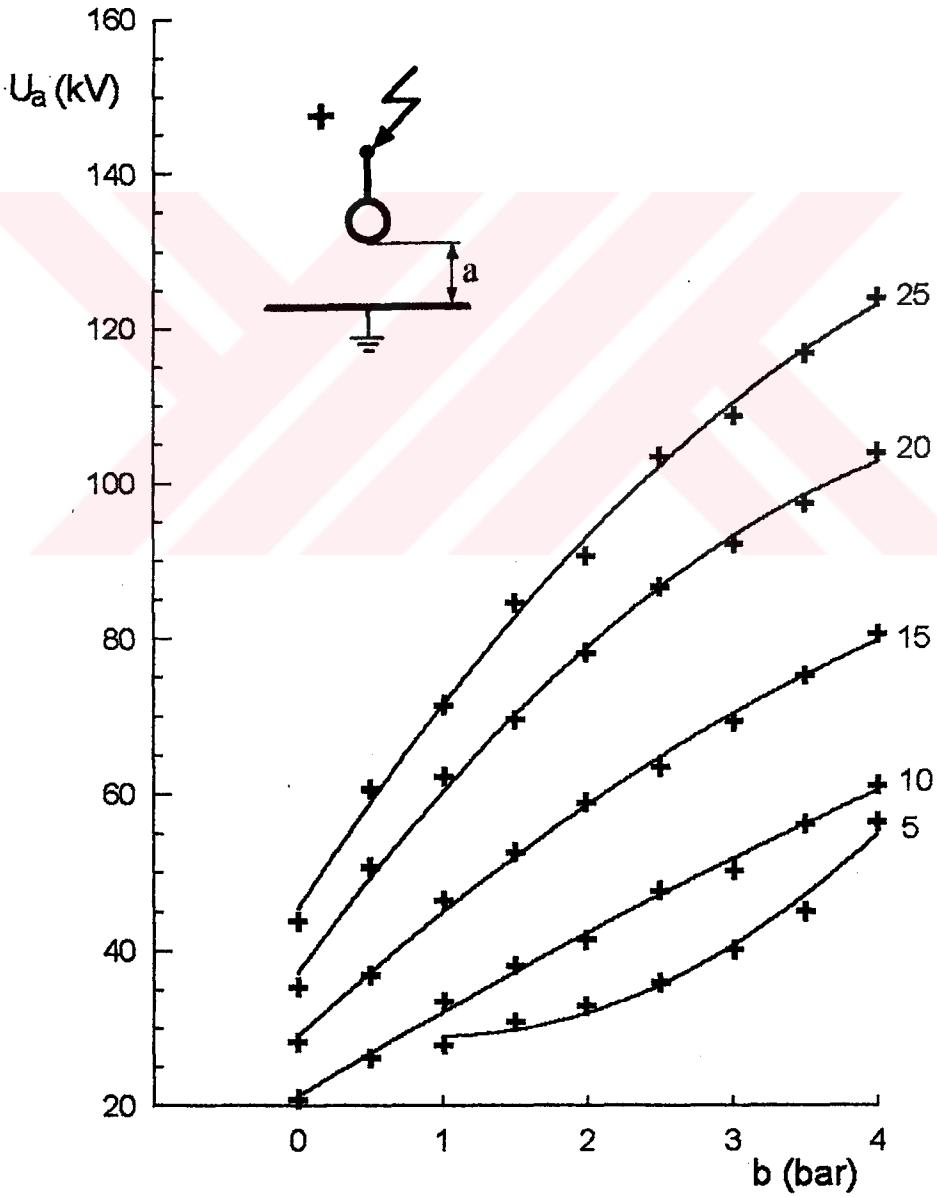
Şekil 5.28. %80 SF₆ + %20 N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.2. Farklı Elektrot Açıklıklarında Darbe Delinme Geriliminin Basınçla Değişimi

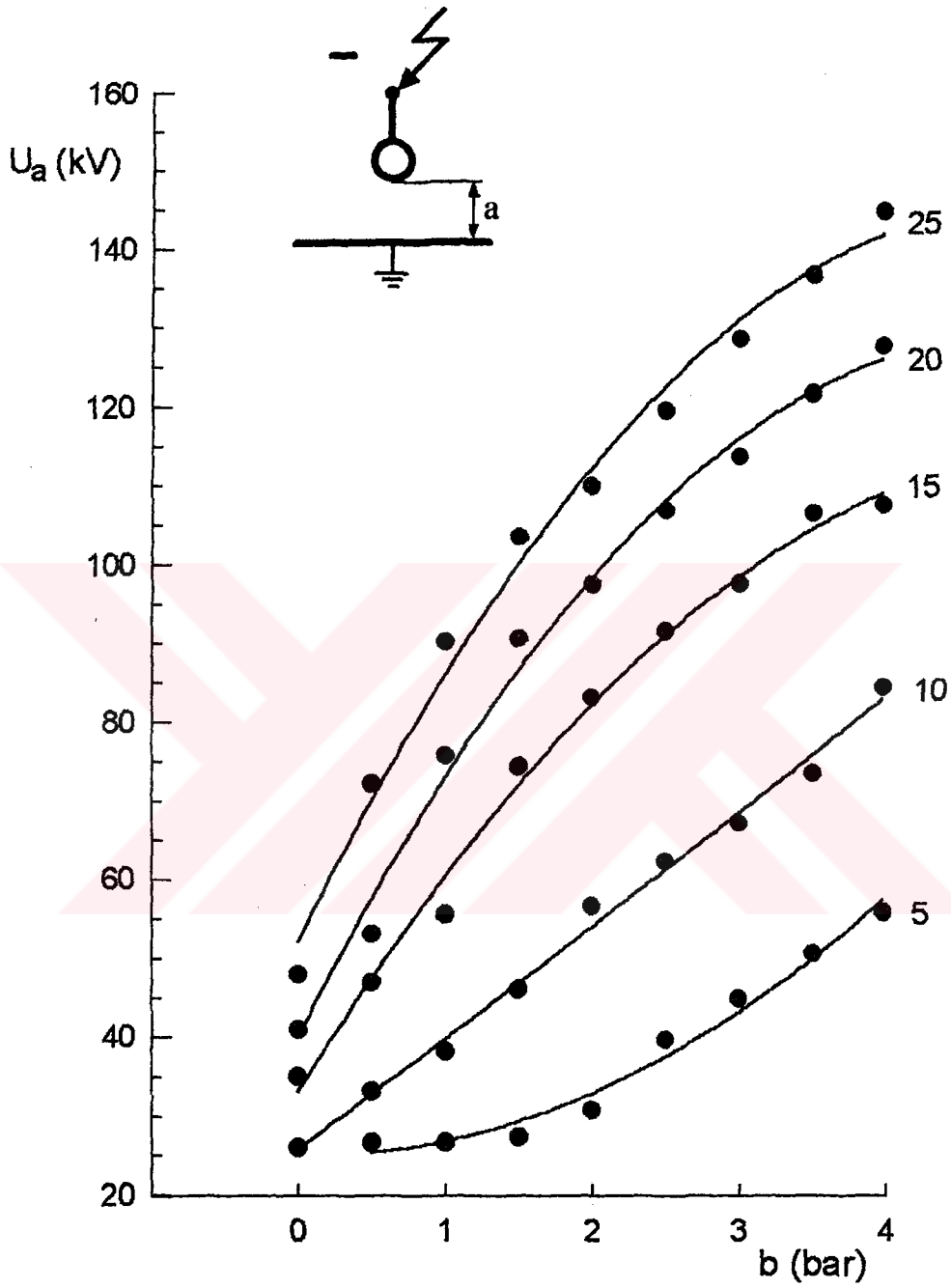
Bu alt bölümde elektrot açıklığının 5-25 mm aralığında sabit değerlerinde basıncın 0-4 bar arasında değişimi ile delinme gerilimi değerleri verilmiştir.

5.2.1. Hava için $U_a = f(b)$ eğrileri

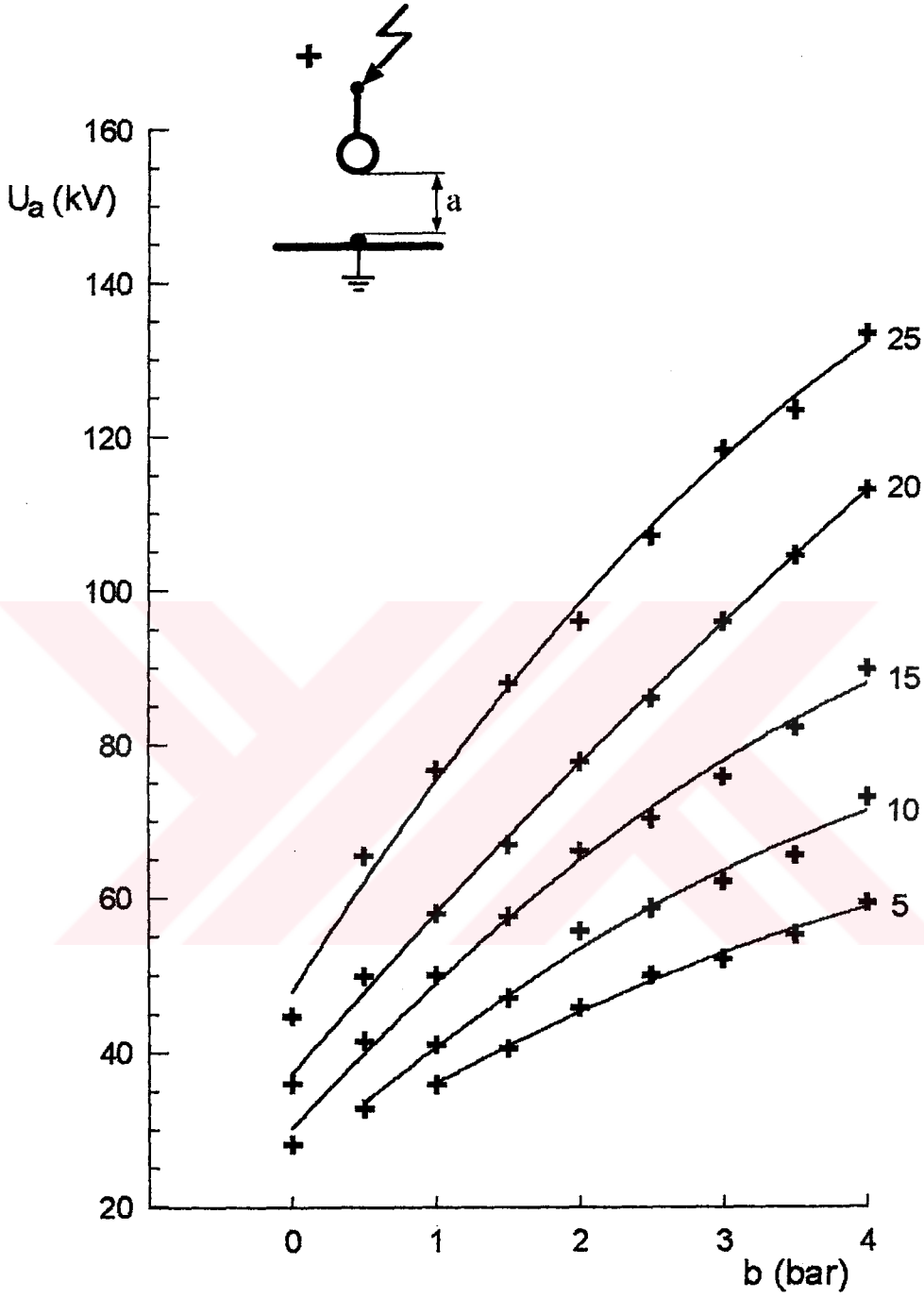
Şekil 5.29-5.32'de hava için sabit elektrot açıklığında, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir.



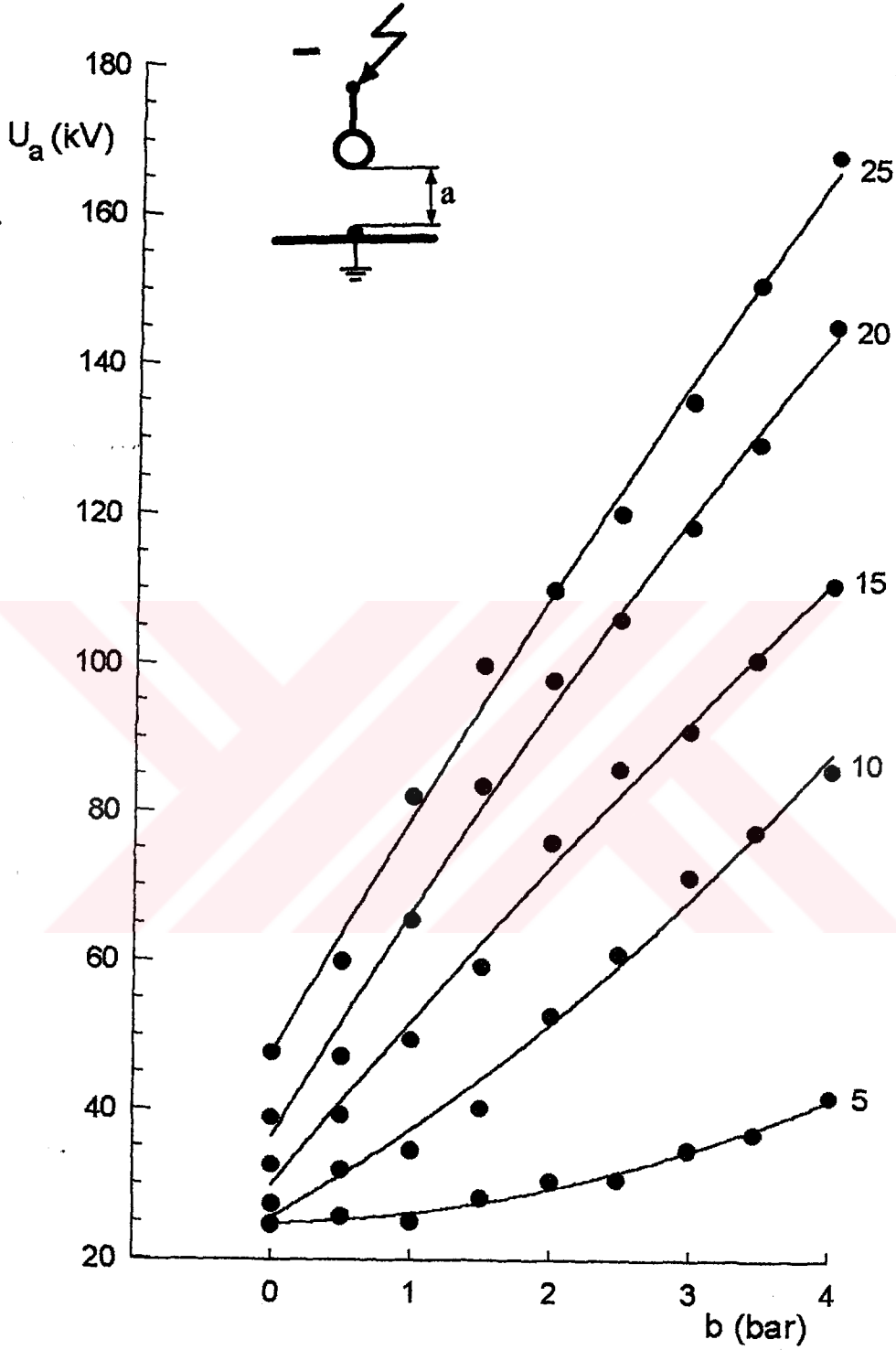
Şekil 5.29. Havada, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



Şekil 5.30. Havada, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



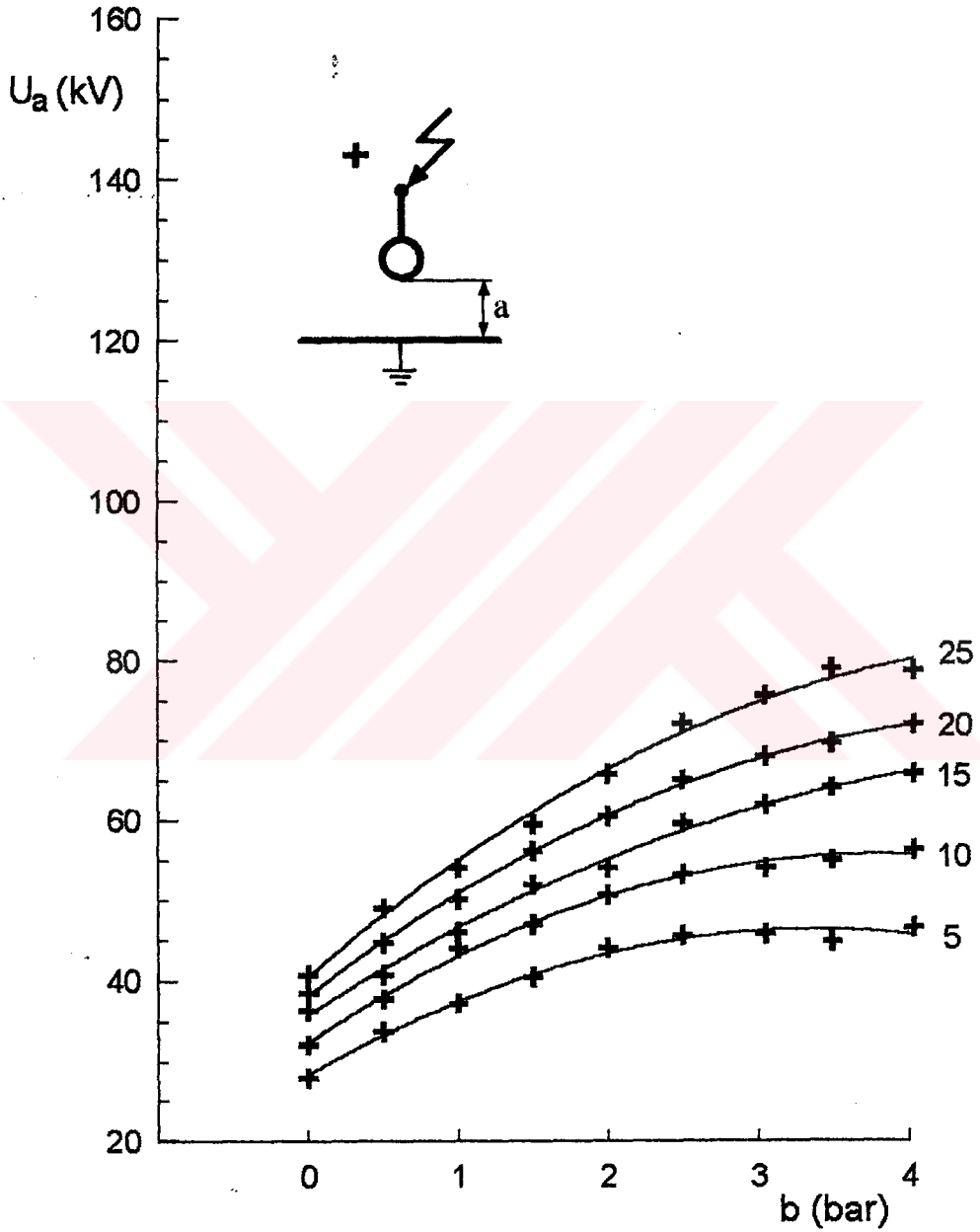
Şekil 5.31. Havada, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



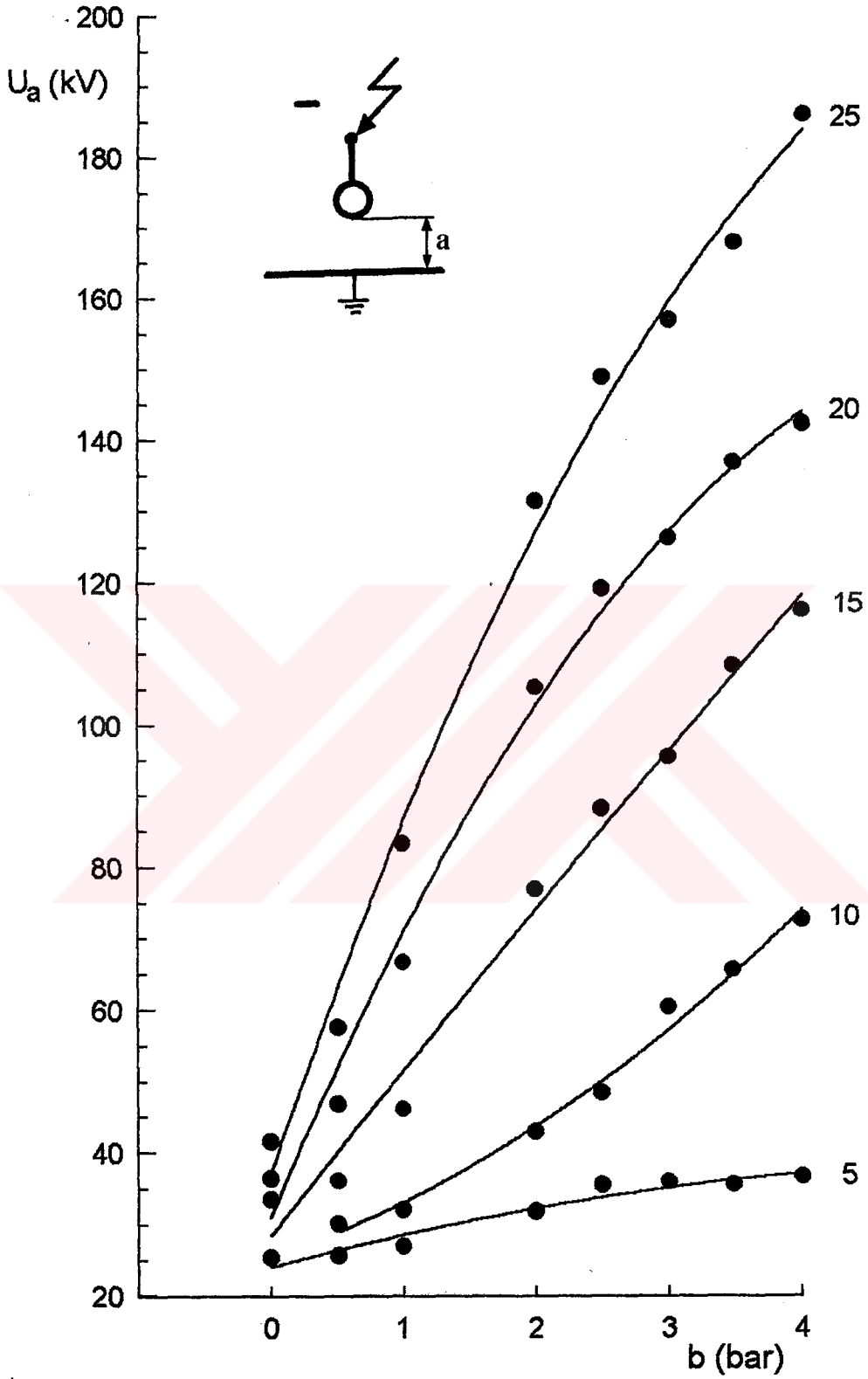
Şekil 5.32. Havada, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.2.2. N₂ için $U_a = f(b)$ eğrileri

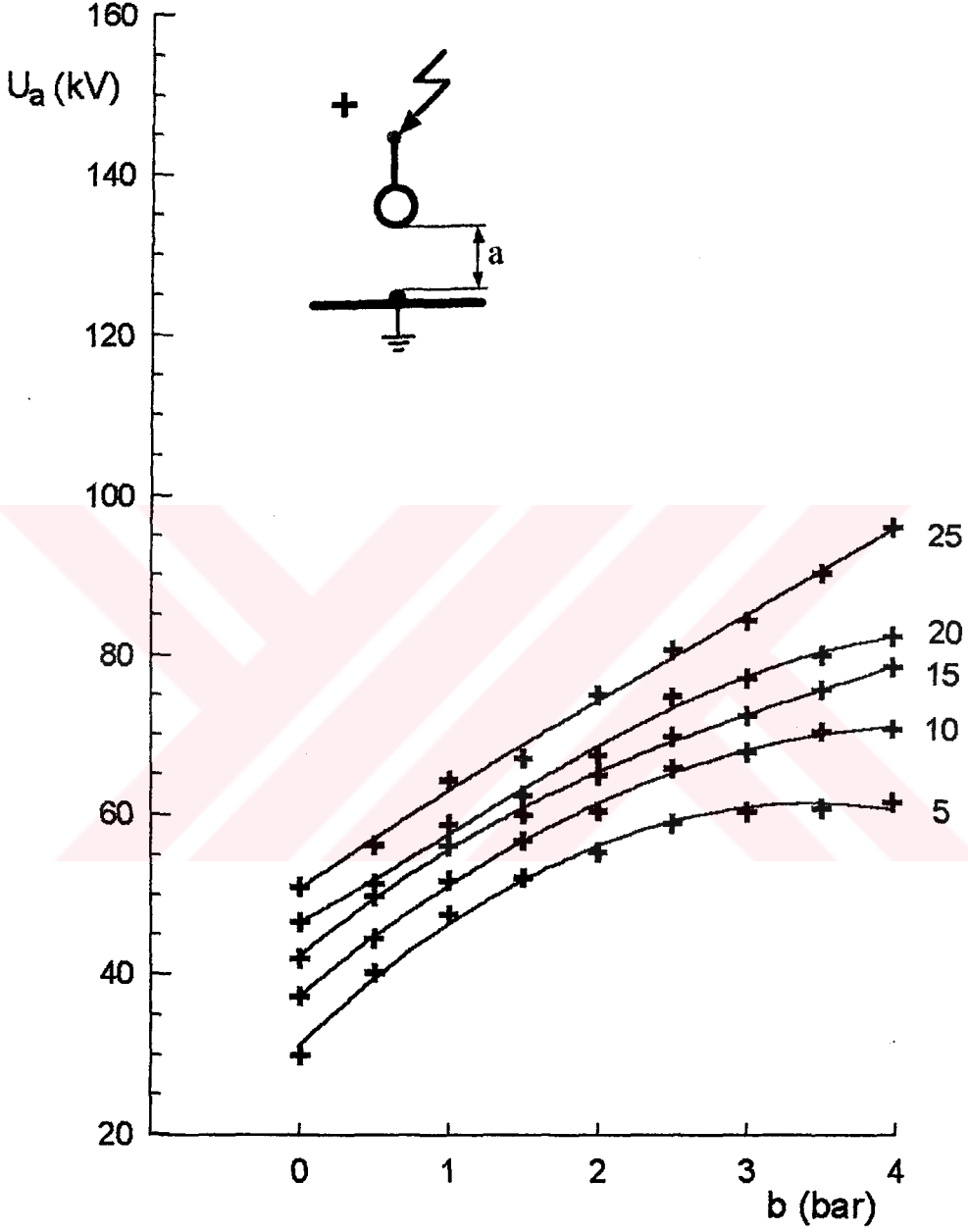
Şekil 5.33-5.36'da N₂ için sabit elektrot açıklığında, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir.



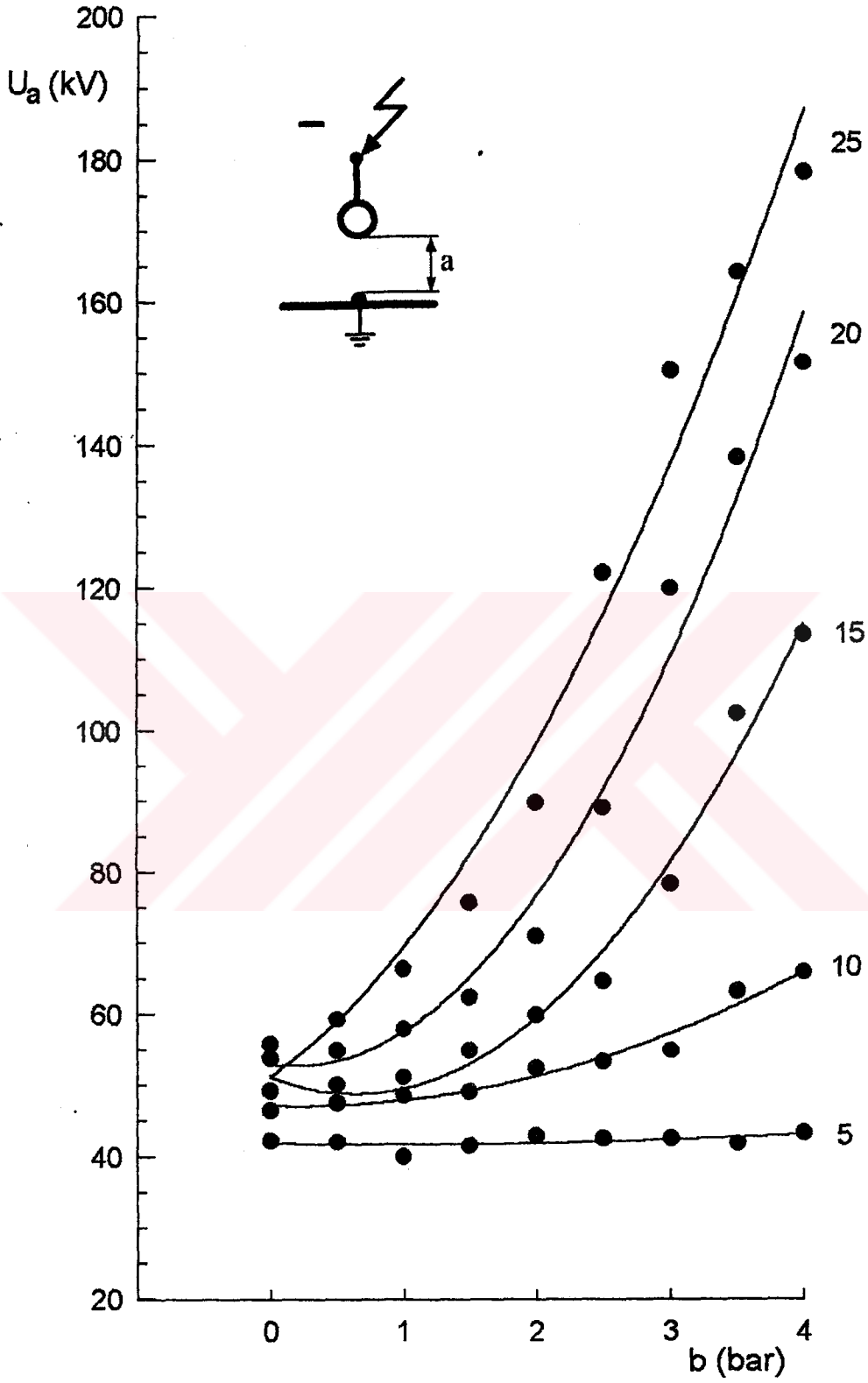
Şekil 5.33. N₂ gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



Şekil 5.34. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



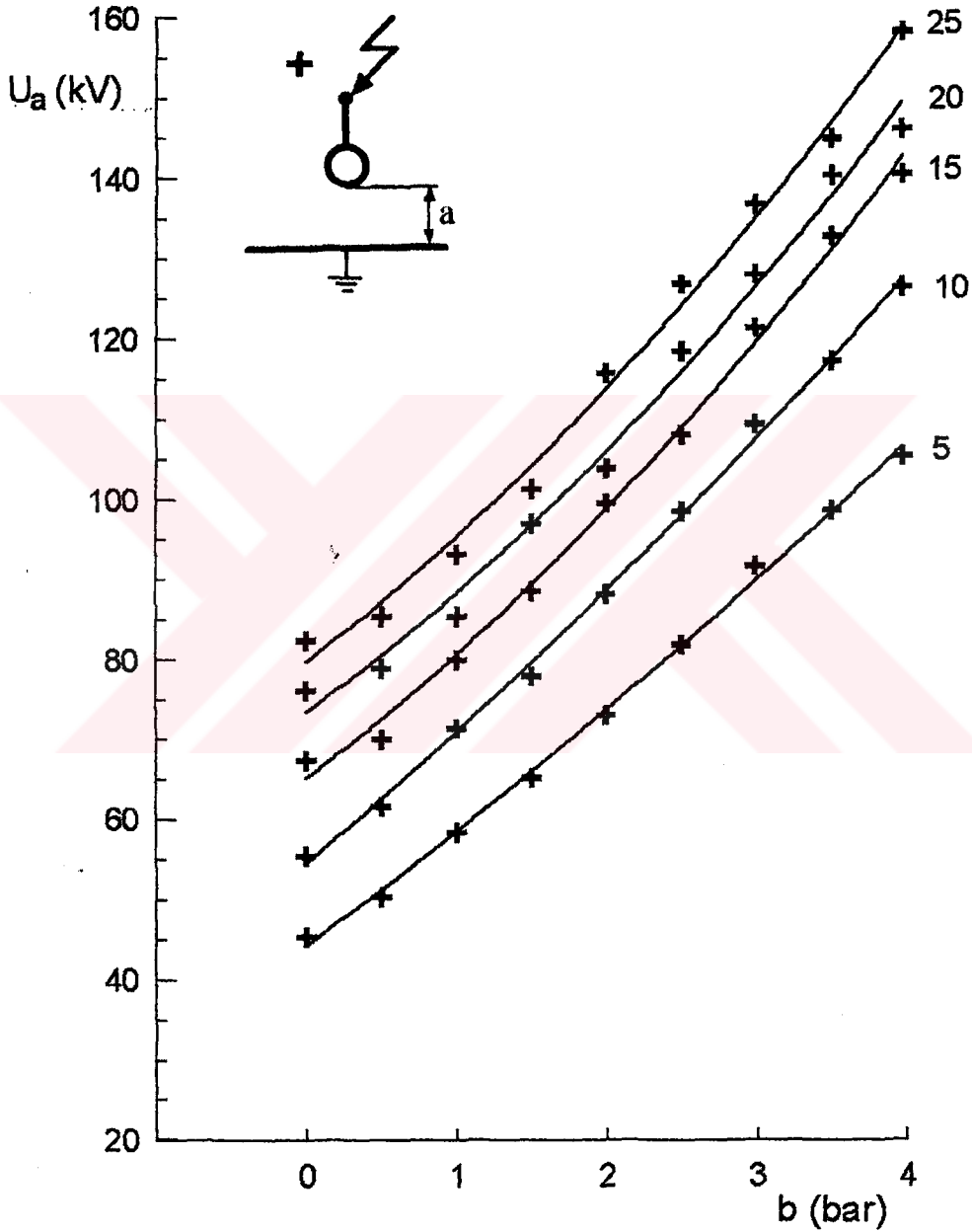
Şekil 5.35. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



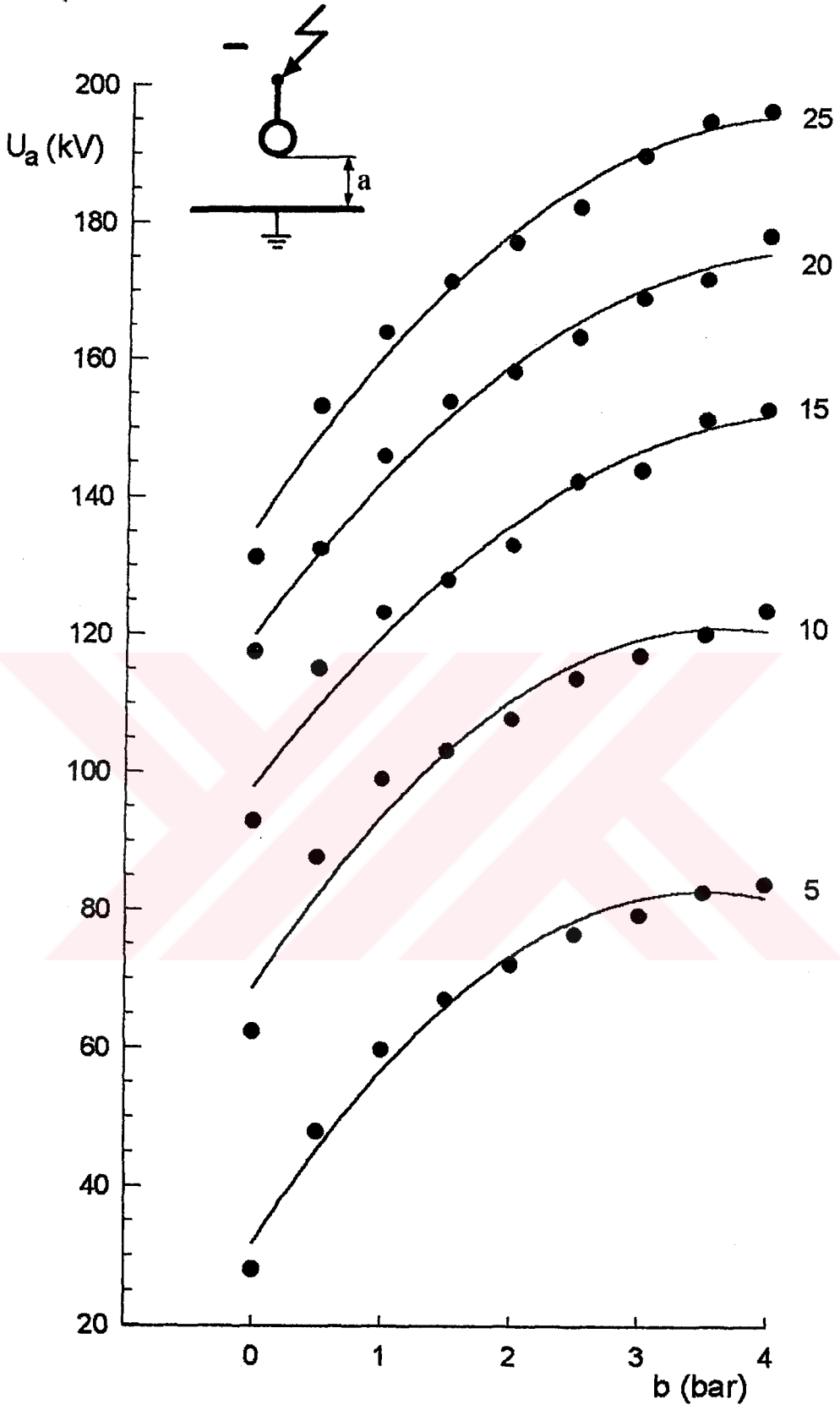
Şekil 5.36. N_2 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.2.3. SF₆ için $U_a = f(b)$ eğrileri

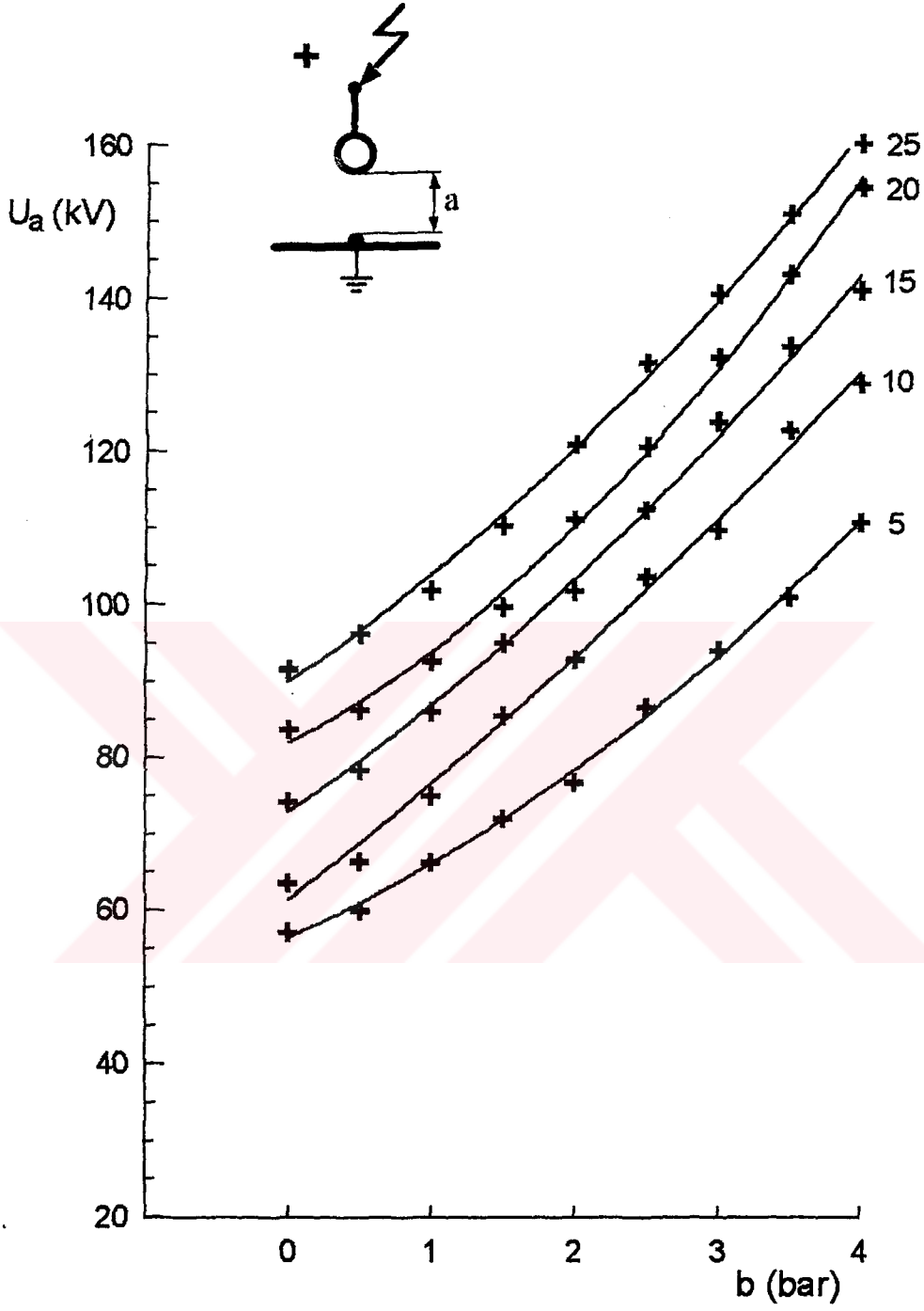
Şekil 5.37-5.40'ta SF₆ için sabit elektrot açıklığında, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir.



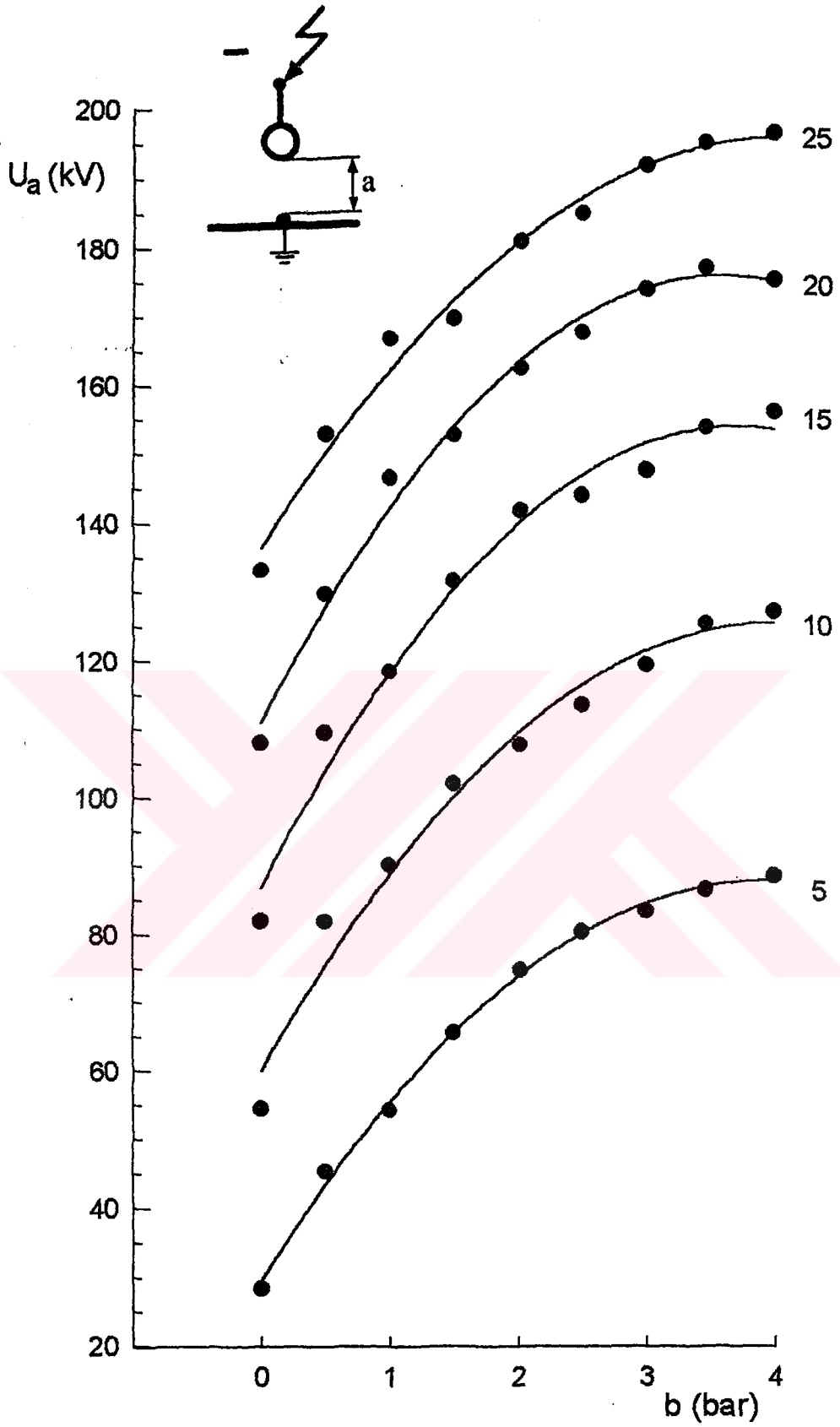
Şekil 5.37. SF₆ gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



Şekil 5.38. SF₆ gazında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



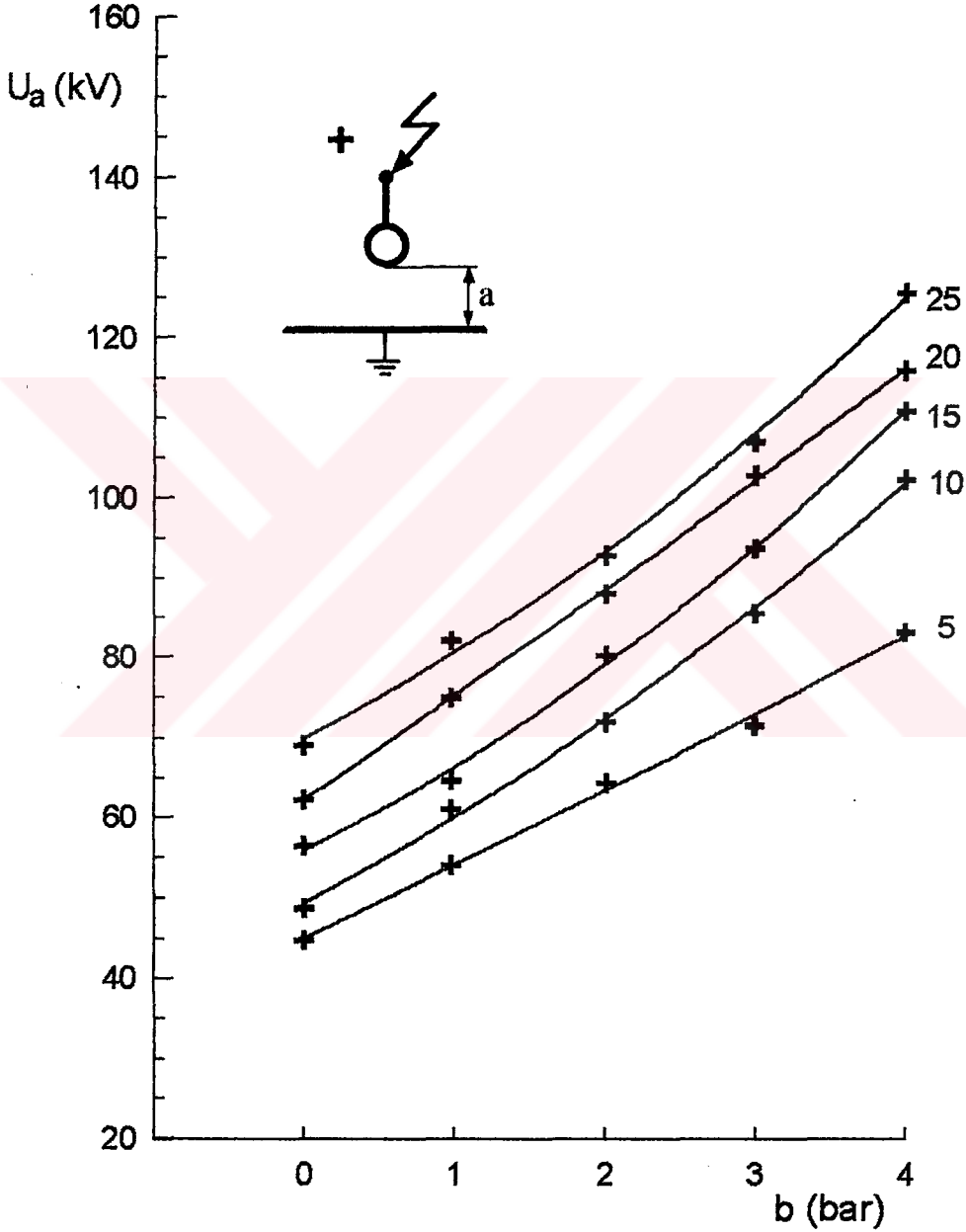
Şekil 5.39. SF_6 gazında, 4 mm çaplı küre-pürtüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürtüz yarıçapı 1 mm).



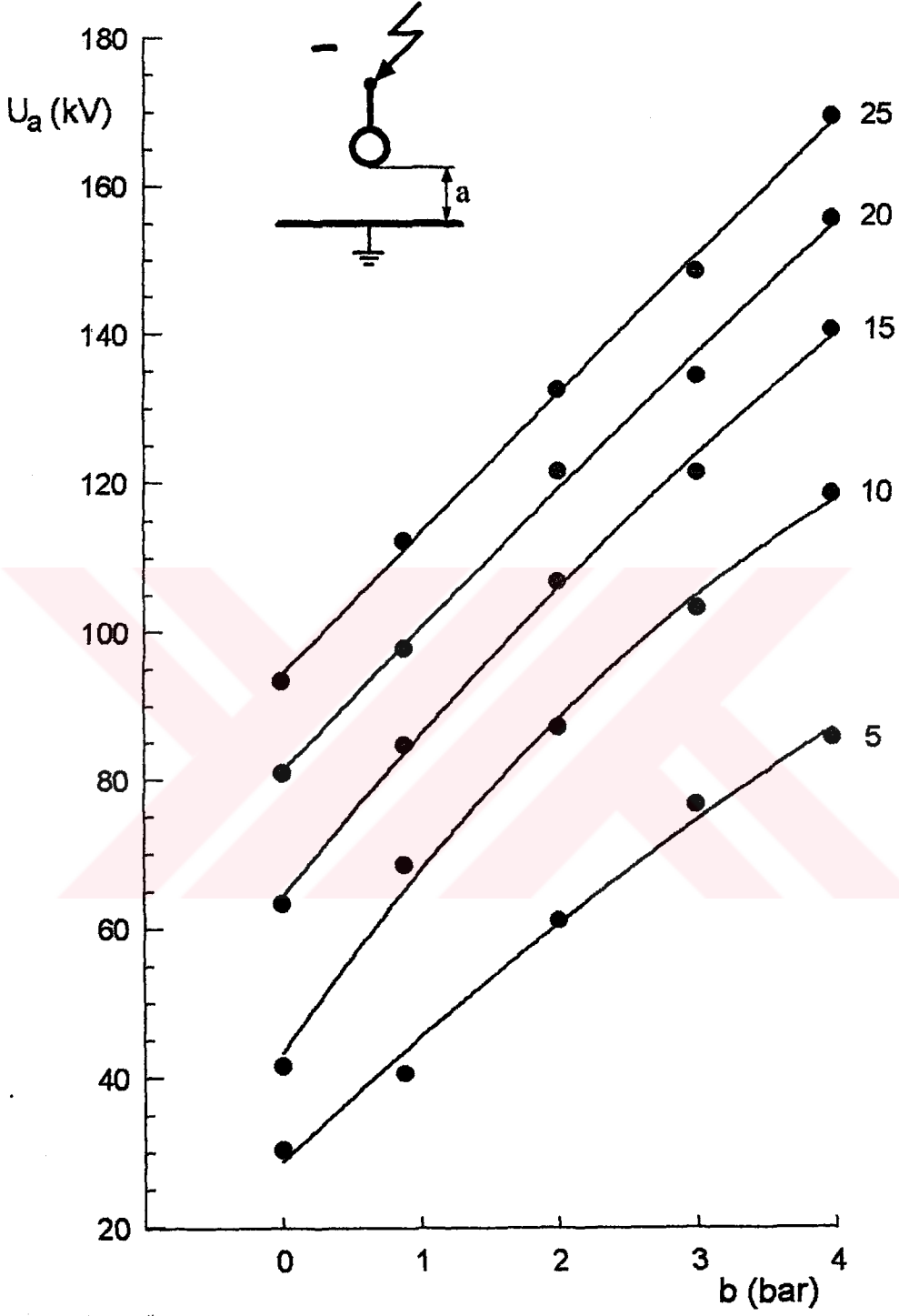
Şekil 5.40. SF_6 gazında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.2.4. $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ için $U_a = f(b)$ eğrileri

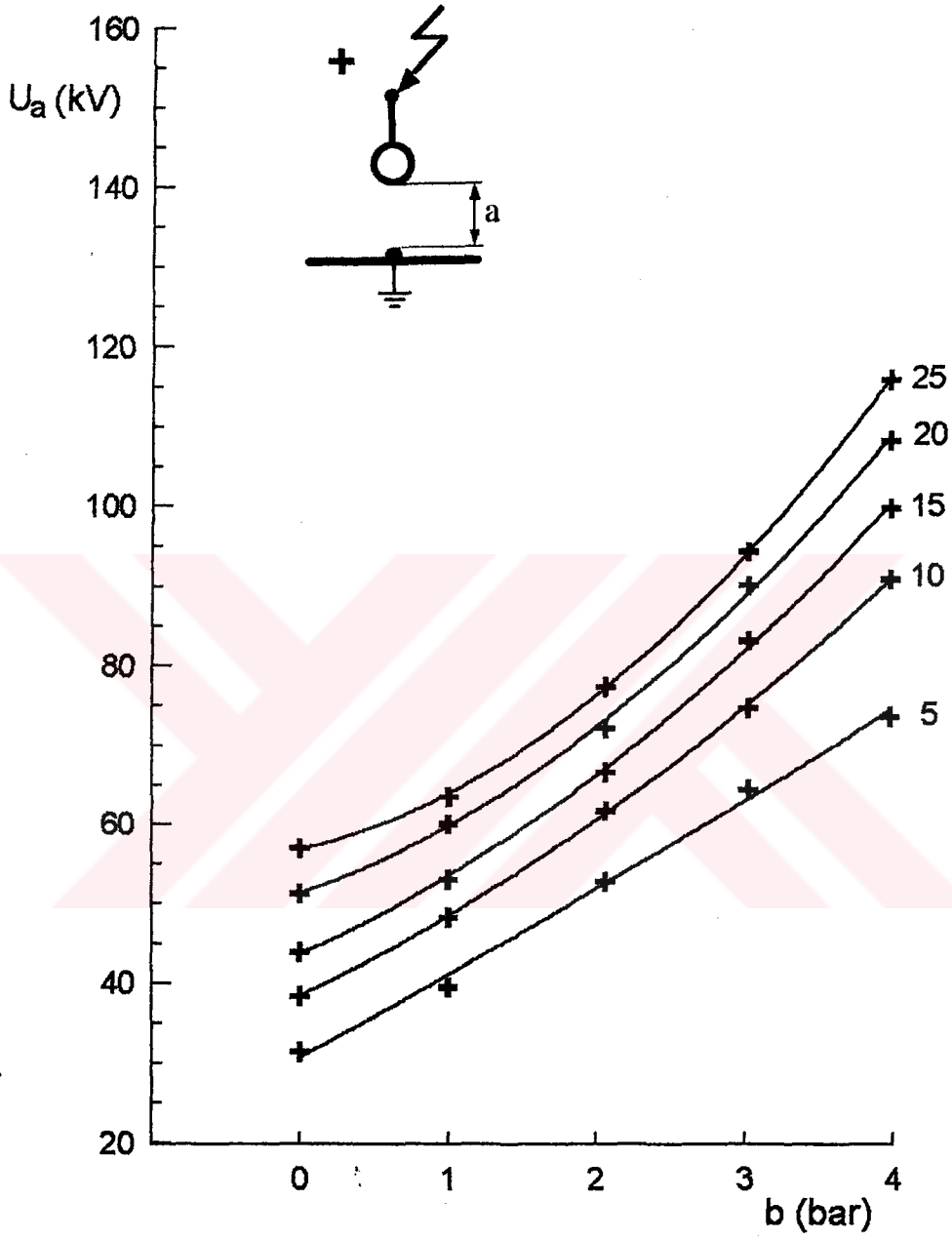
Şekil 5.41-5.44'te %20 $\text{SF}_6 + \%80 \text{N}_2$; şekil 5.45-5.48'de %40 $\text{SF}_6 + \%60 \text{N}_2$; şekil 5.49-5.52'de %60 $\text{SF}_6 + \%40 \text{N}_2$ ve şekil 5.53-5.56'da %80 $\text{SF}_6 + \%20 \text{N}_2$ oranlarında gaz karışımları için sabit elektrot açıklığında, pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir.



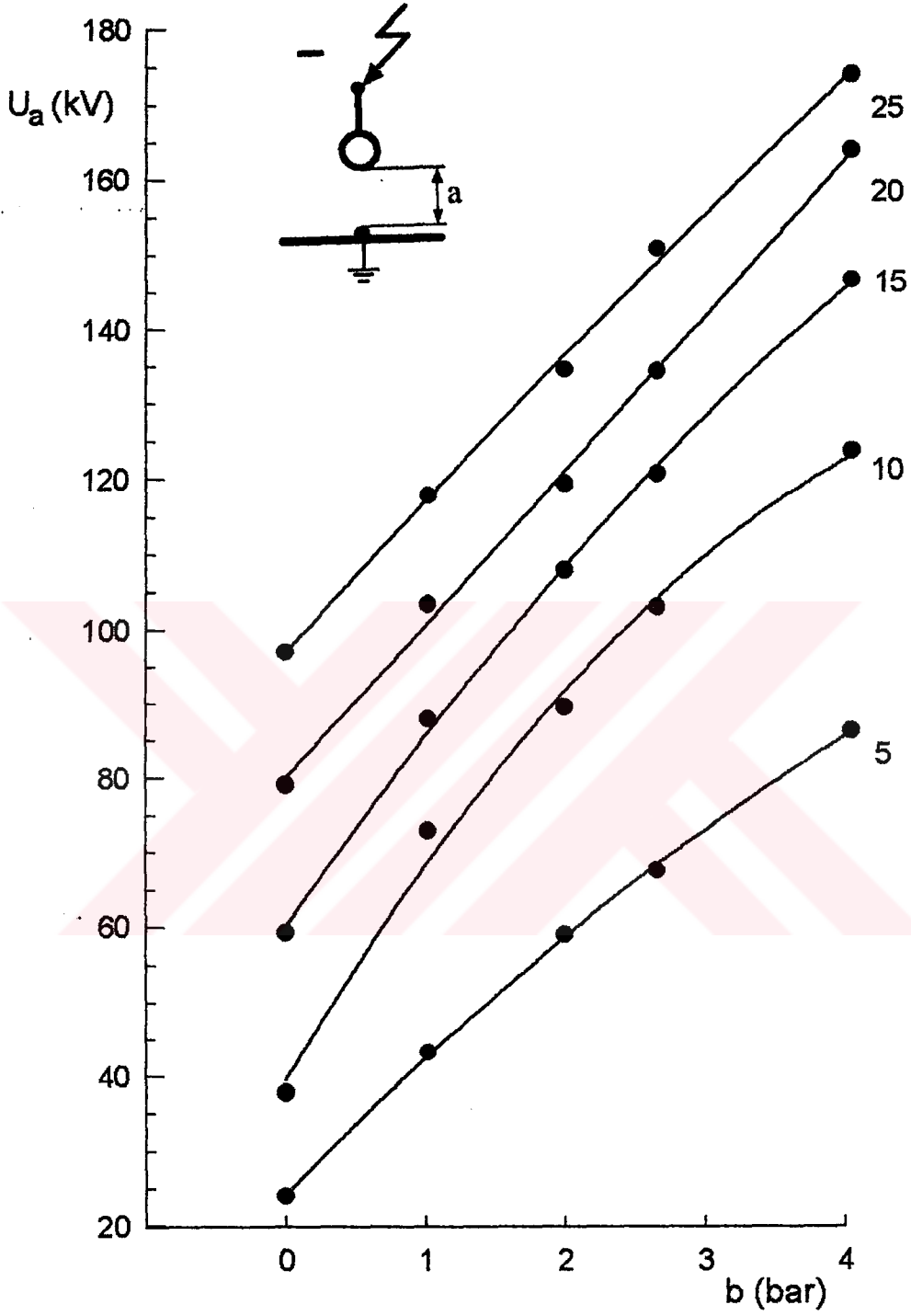
Şekil 5.41. %20 $\text{SF}_6 + \%80 \text{N}_2$ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



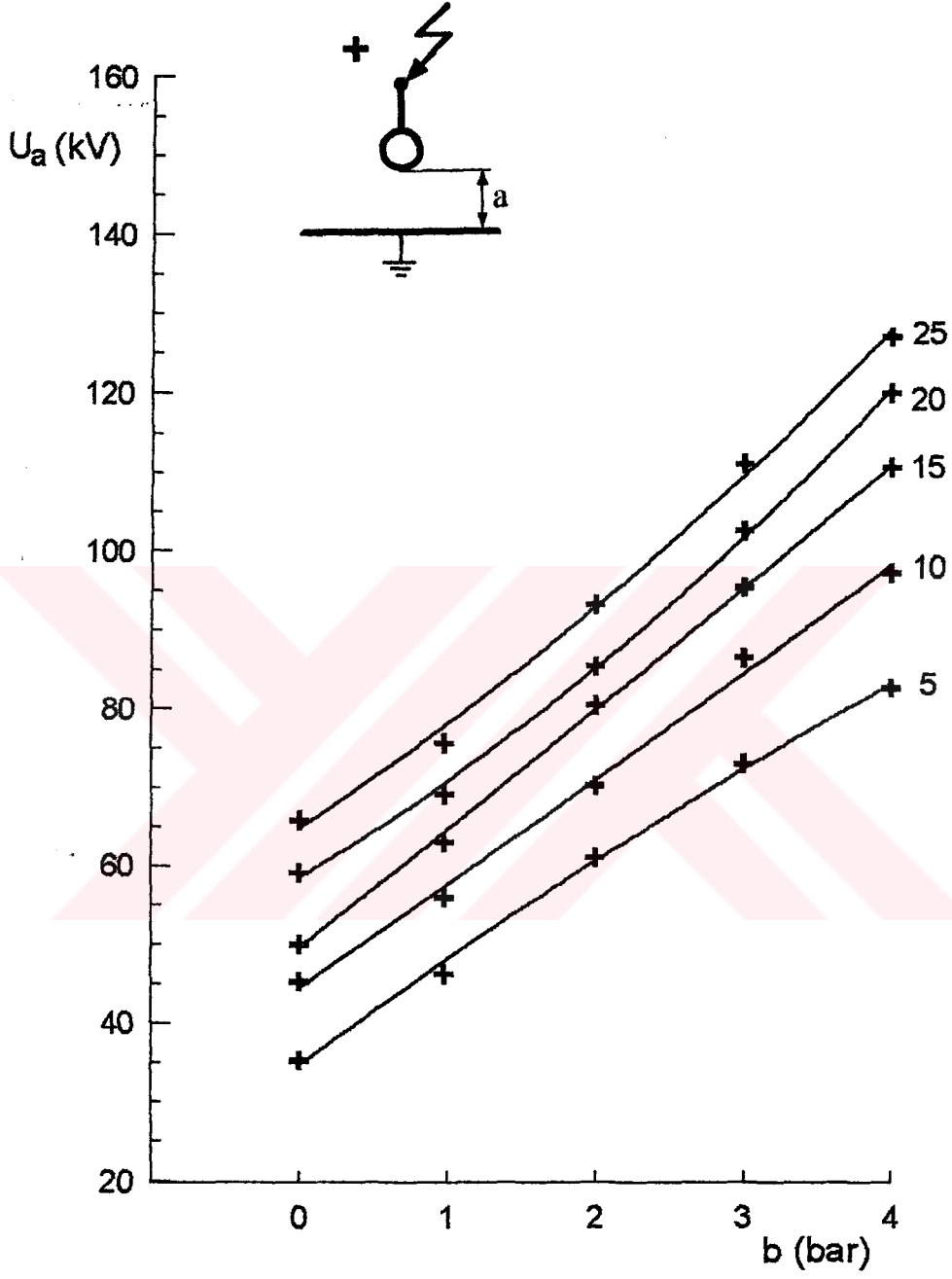
Şekil 5.42. %20 SF_6 + %80 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



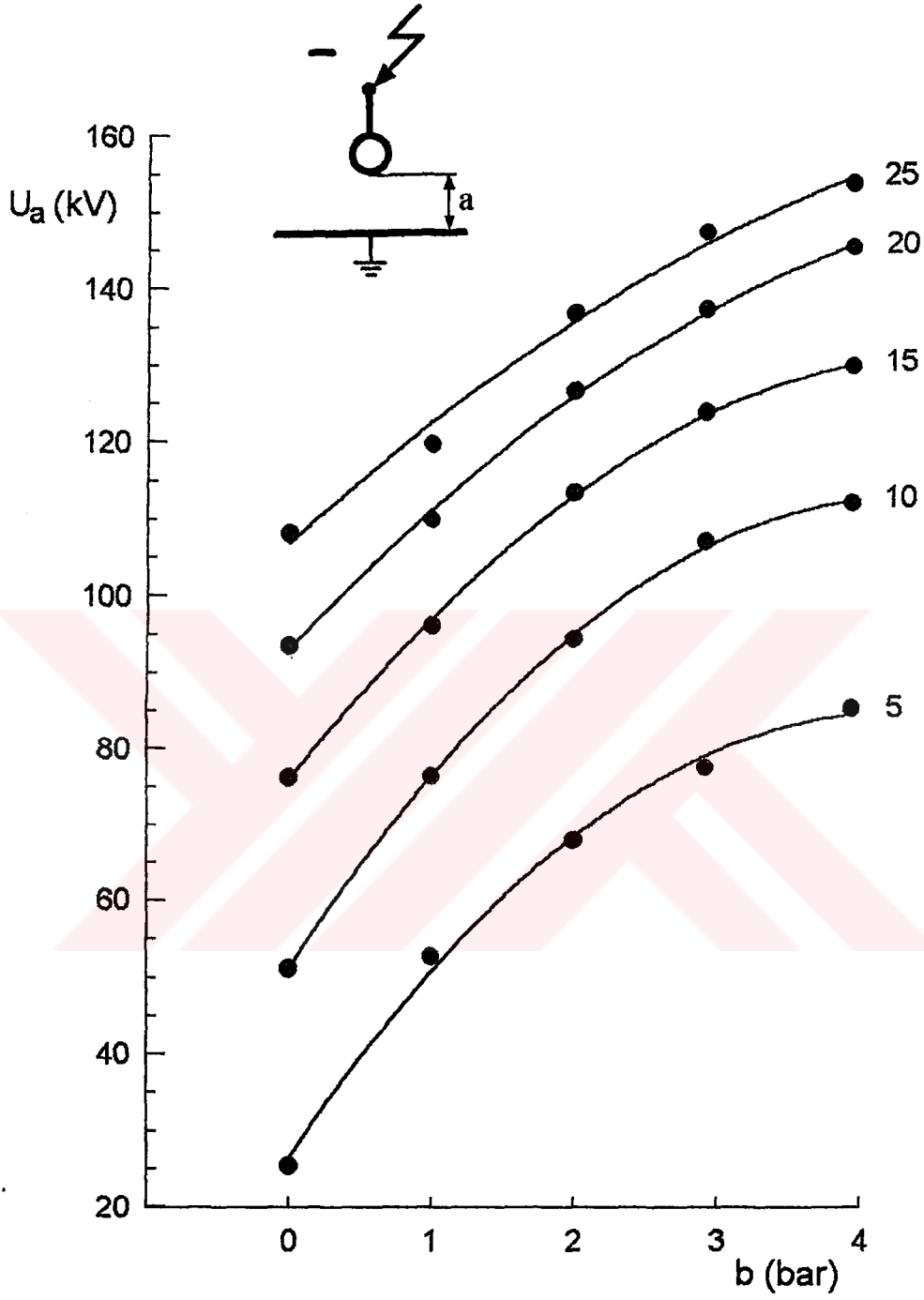
Şekil 5.43. %20 SF_6 + %80 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



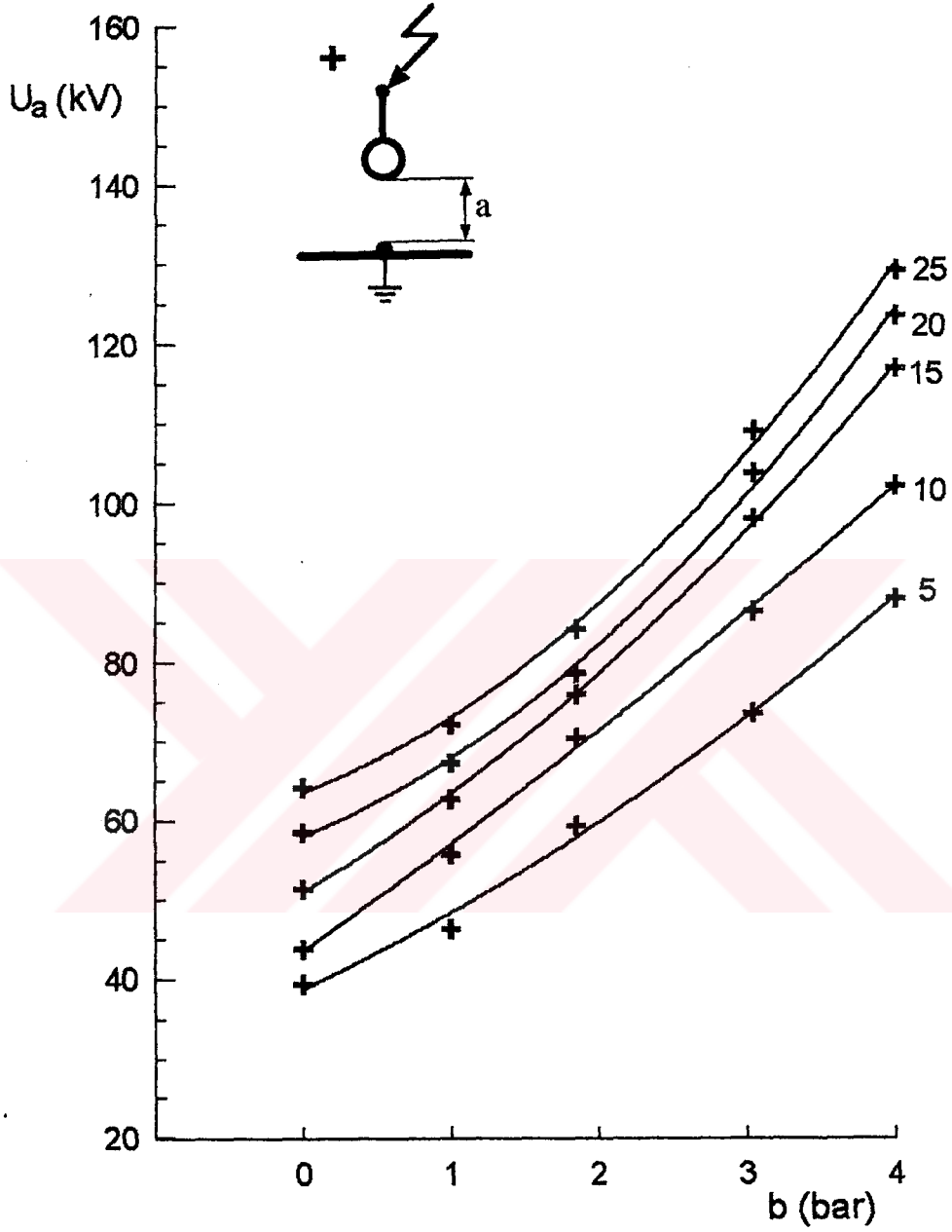
Şekil 5.44. %20 SF_6 + %80 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



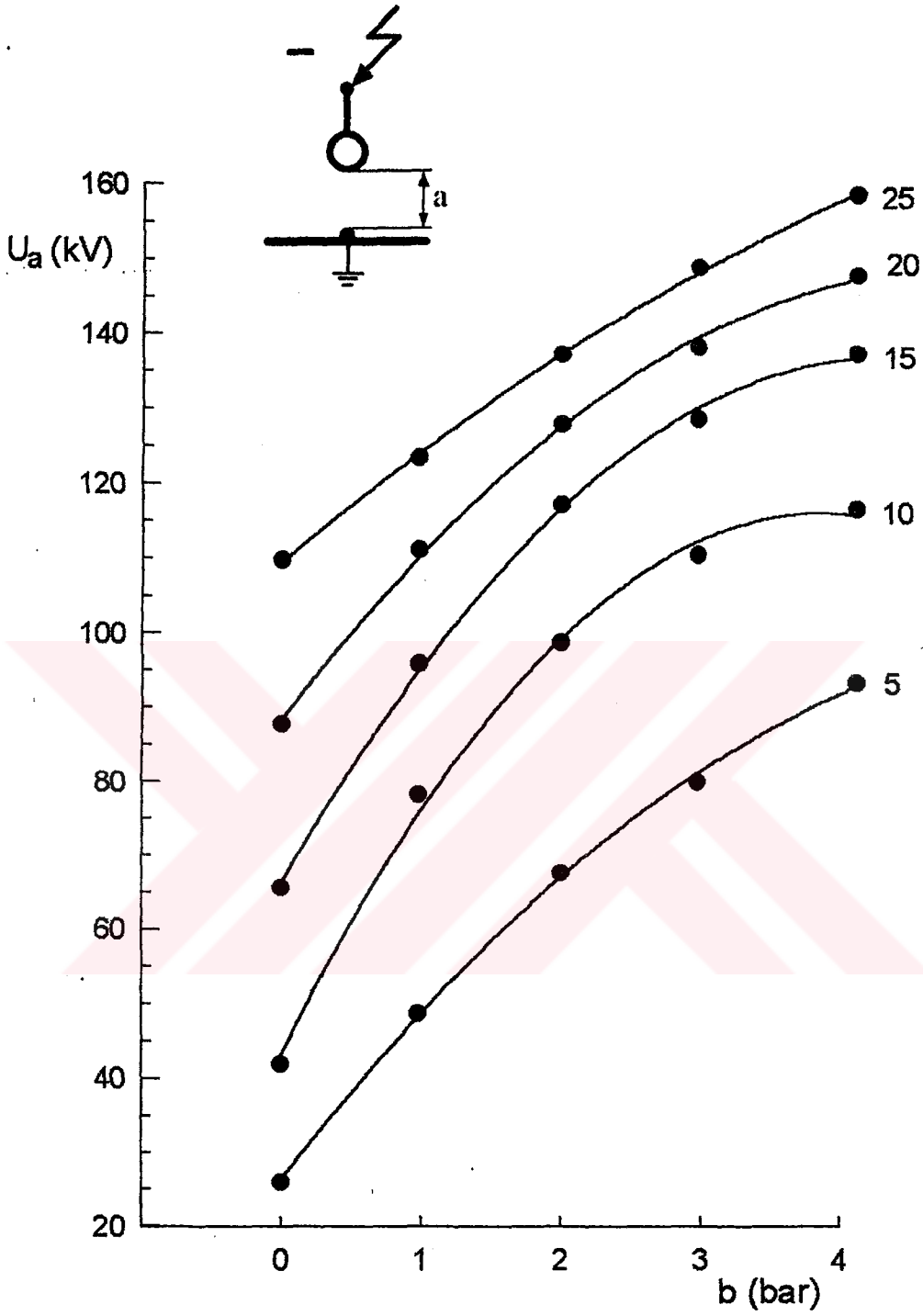
Şekil 5.45. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



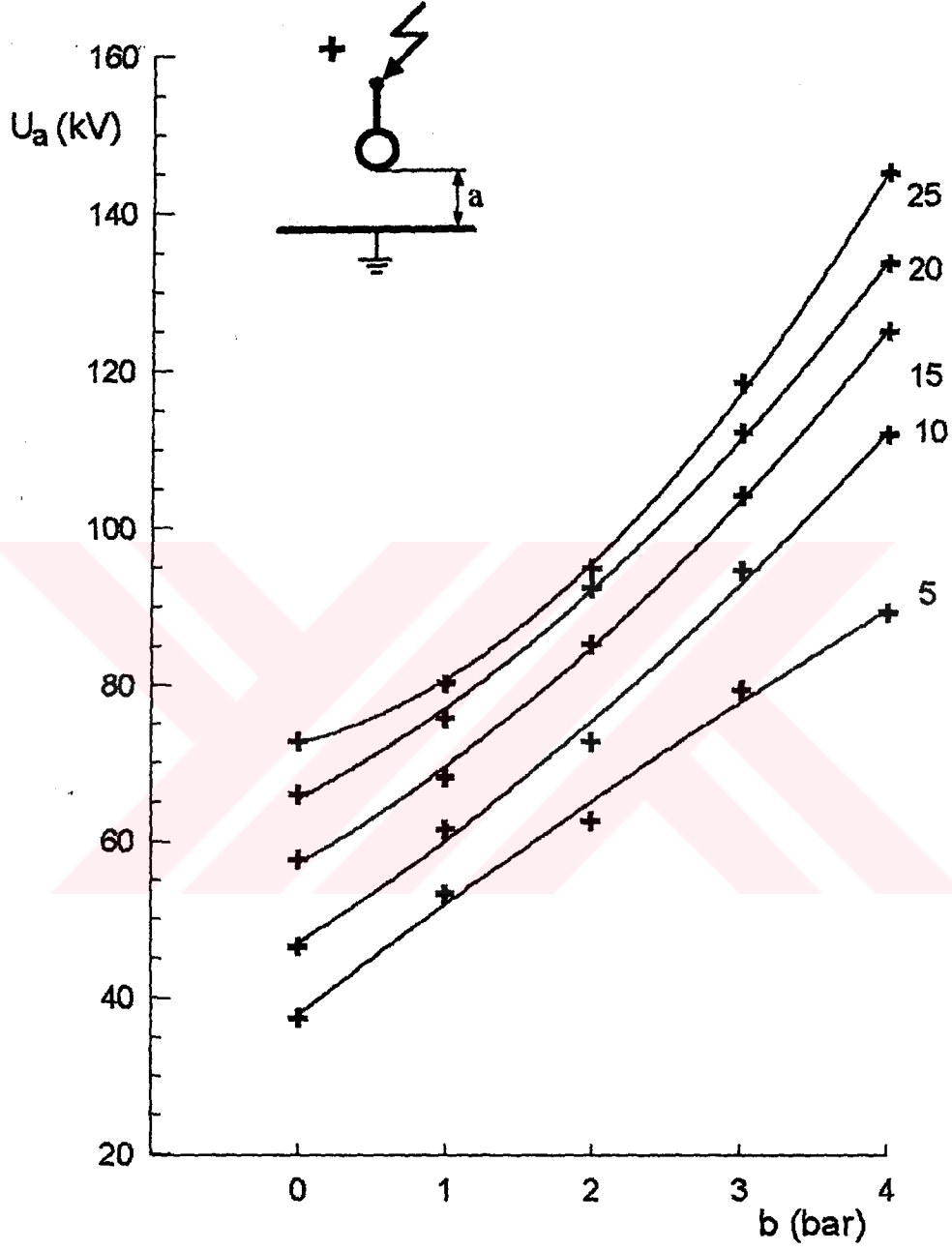
Şekil 5.46. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



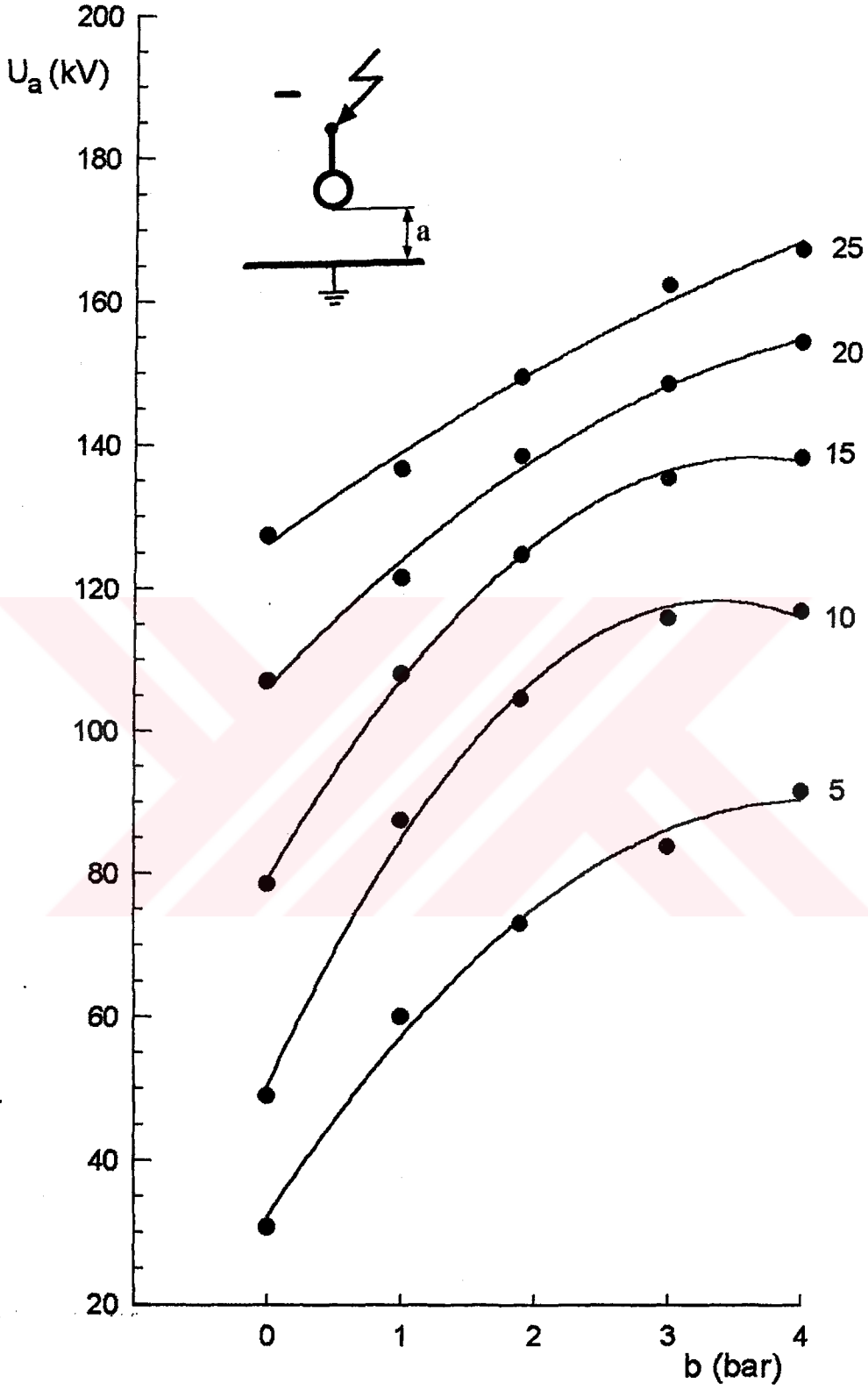
Şekil 5.47. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



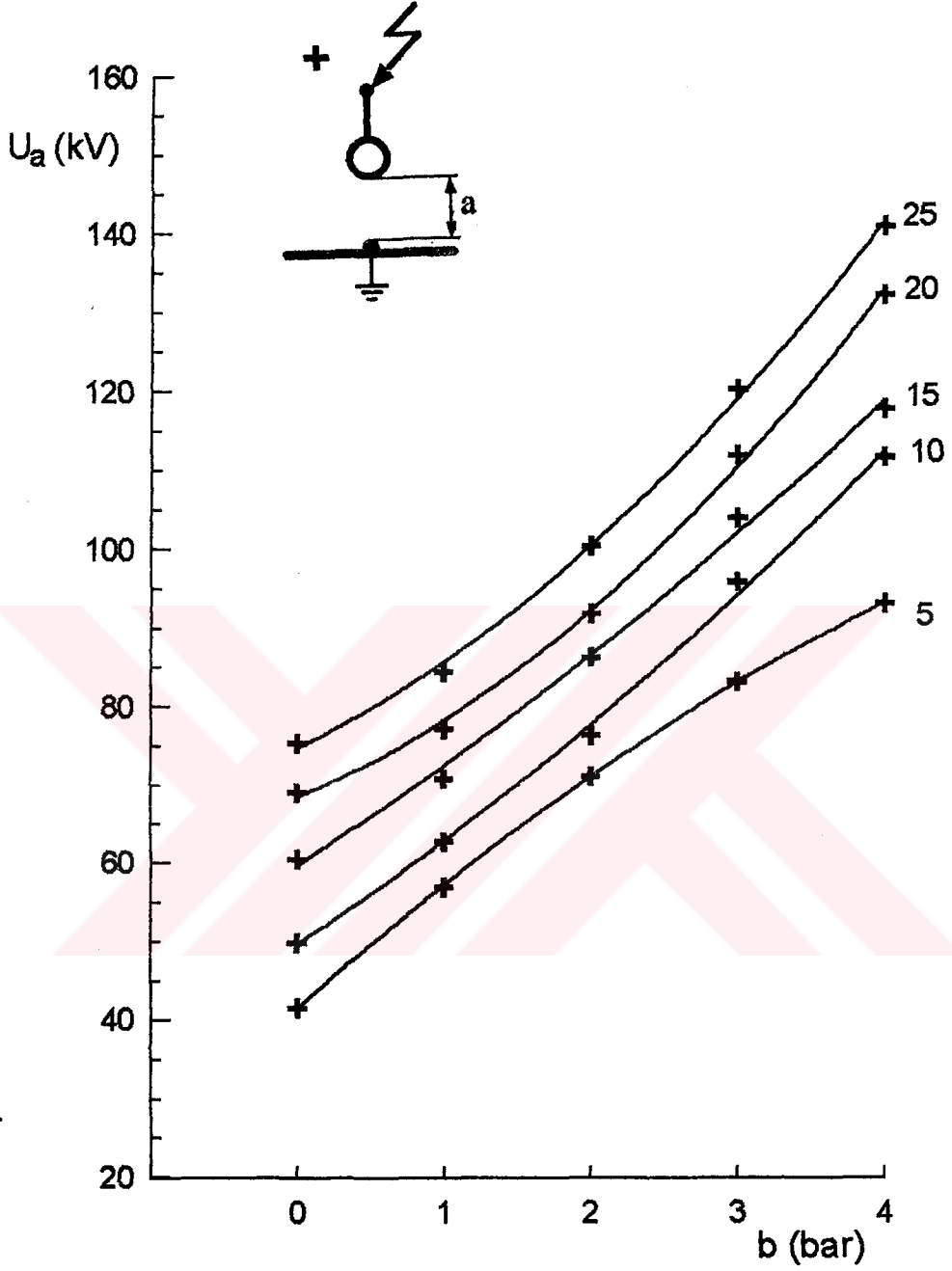
Şekil 5.48. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



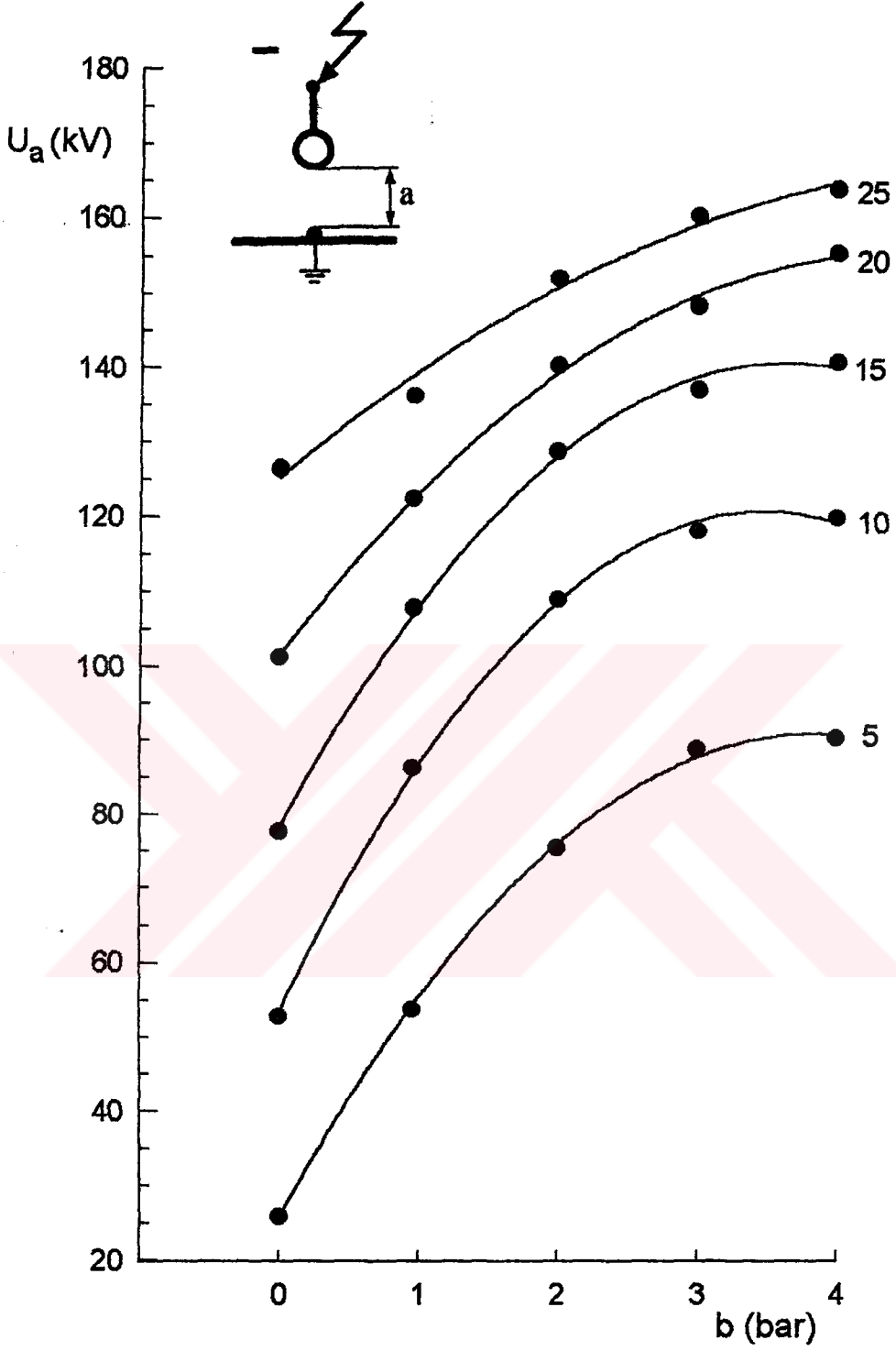
Şekil 5.49. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



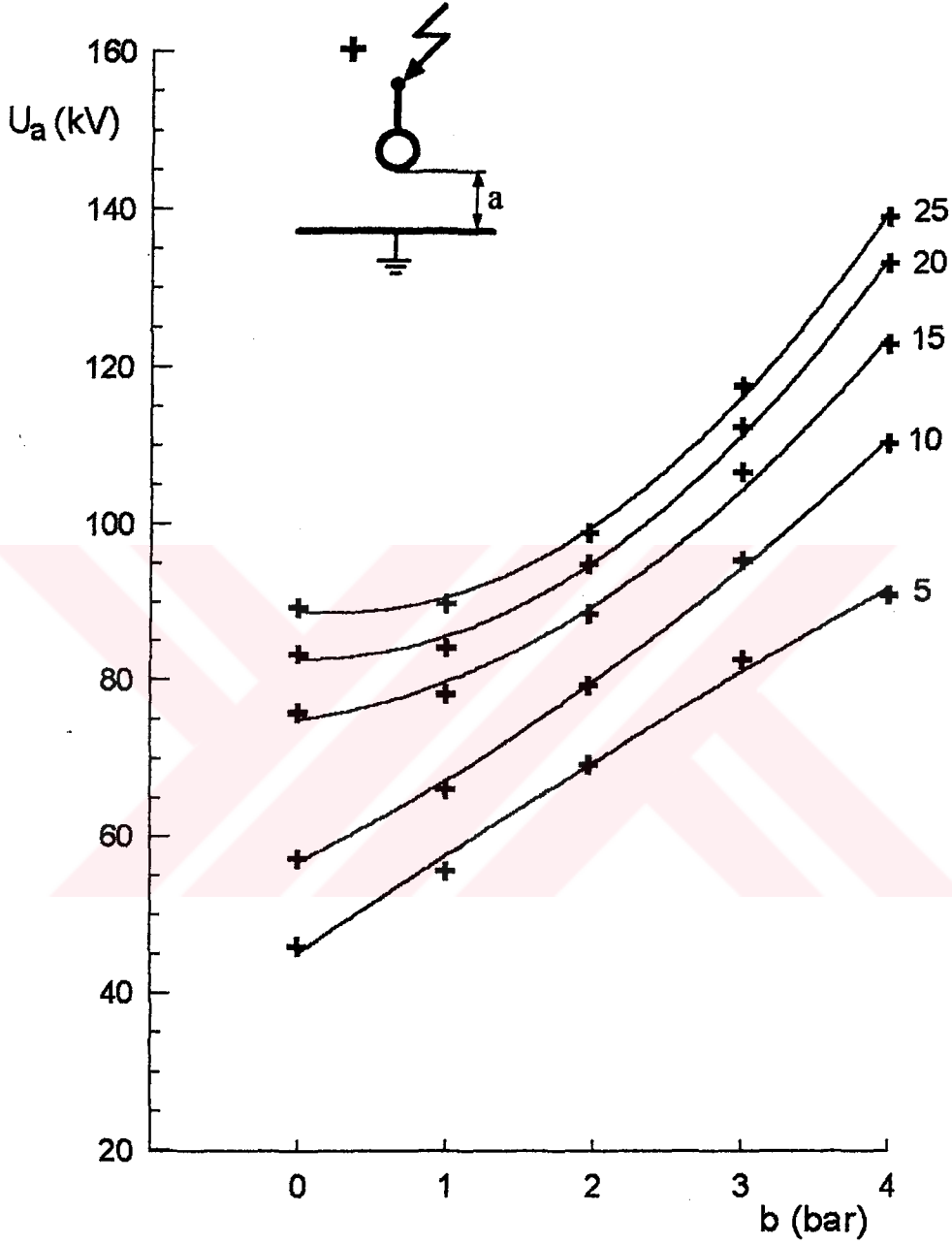
Şekil 5.50. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



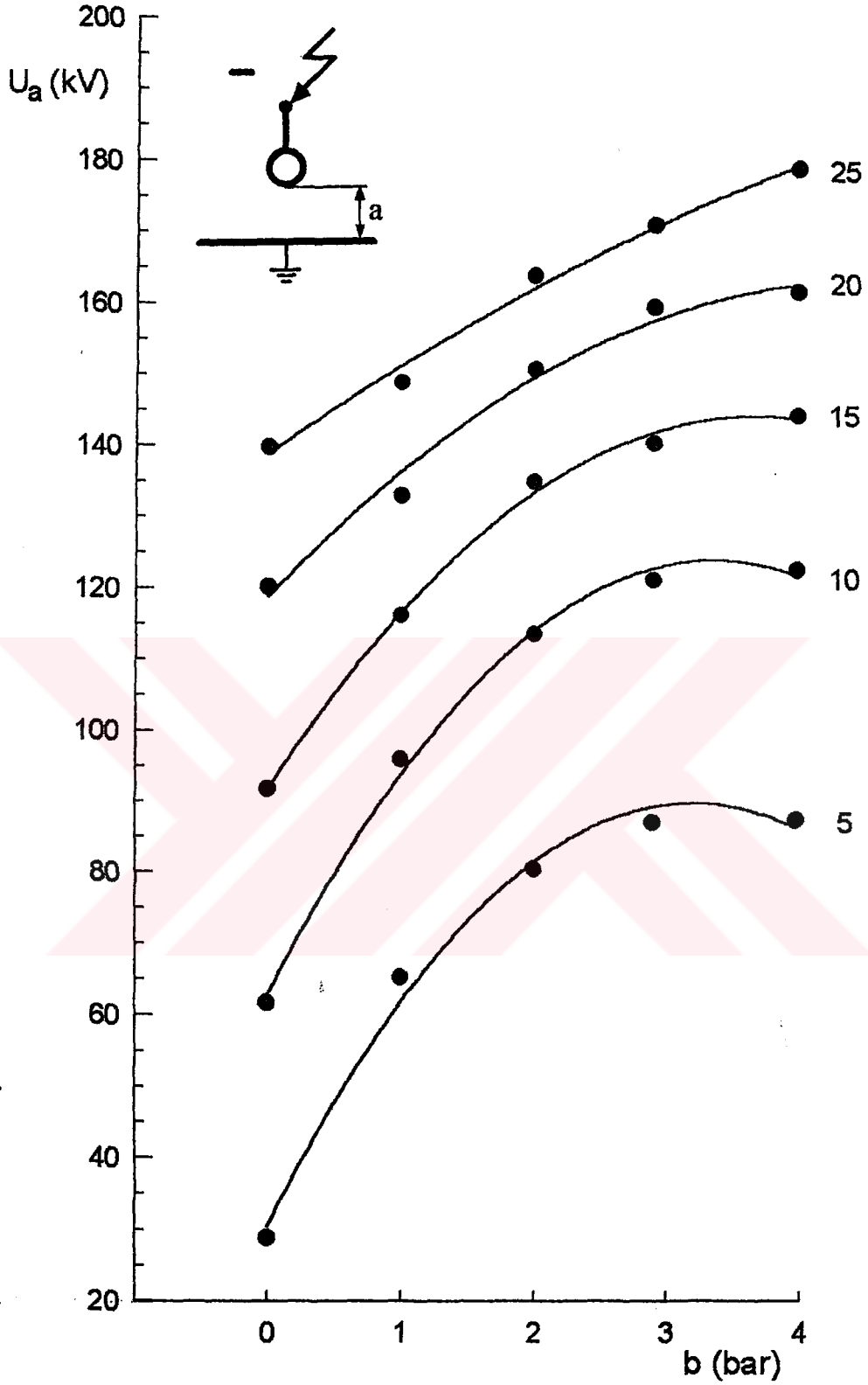
Şekil 5.51. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



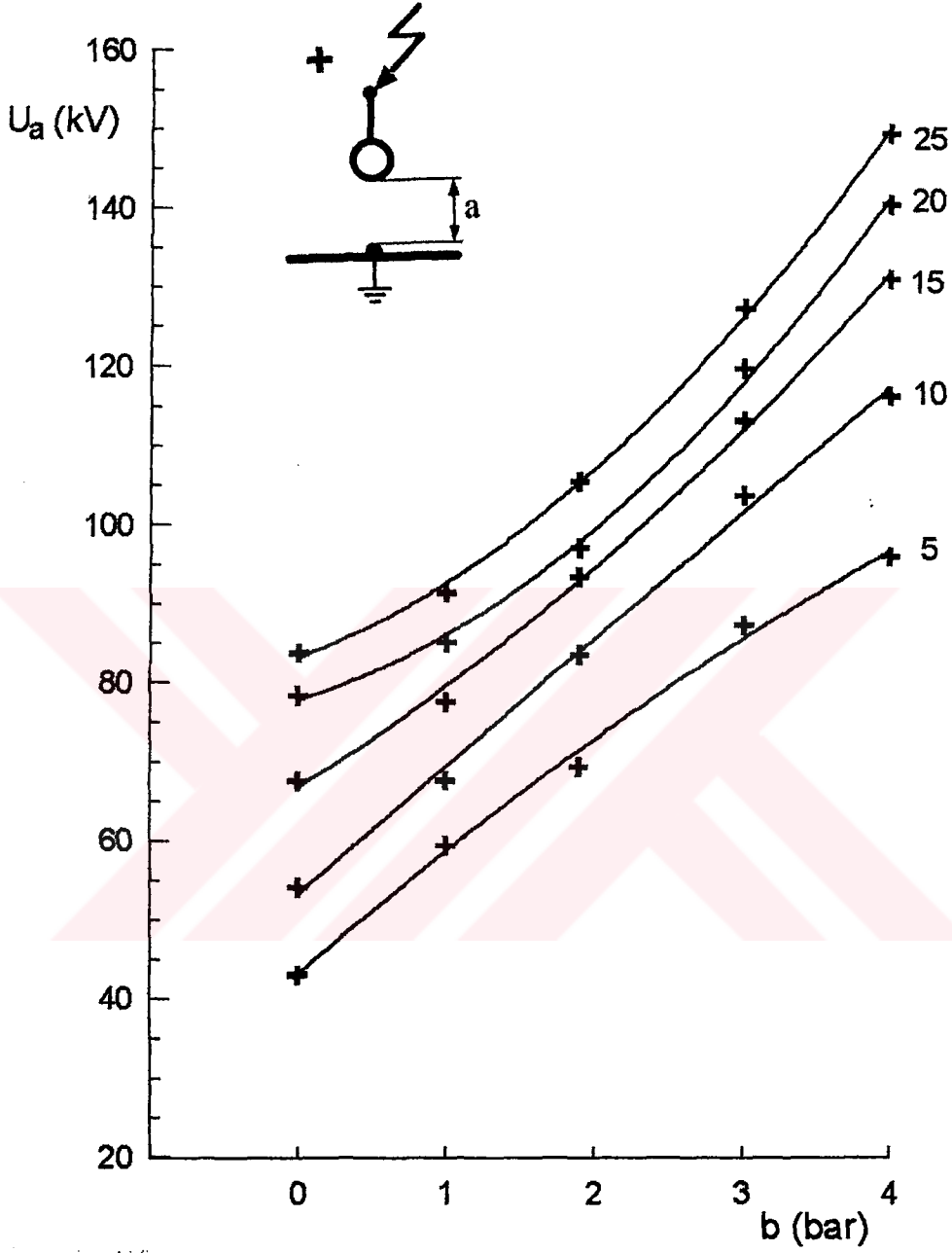
Şekil 5.52. %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



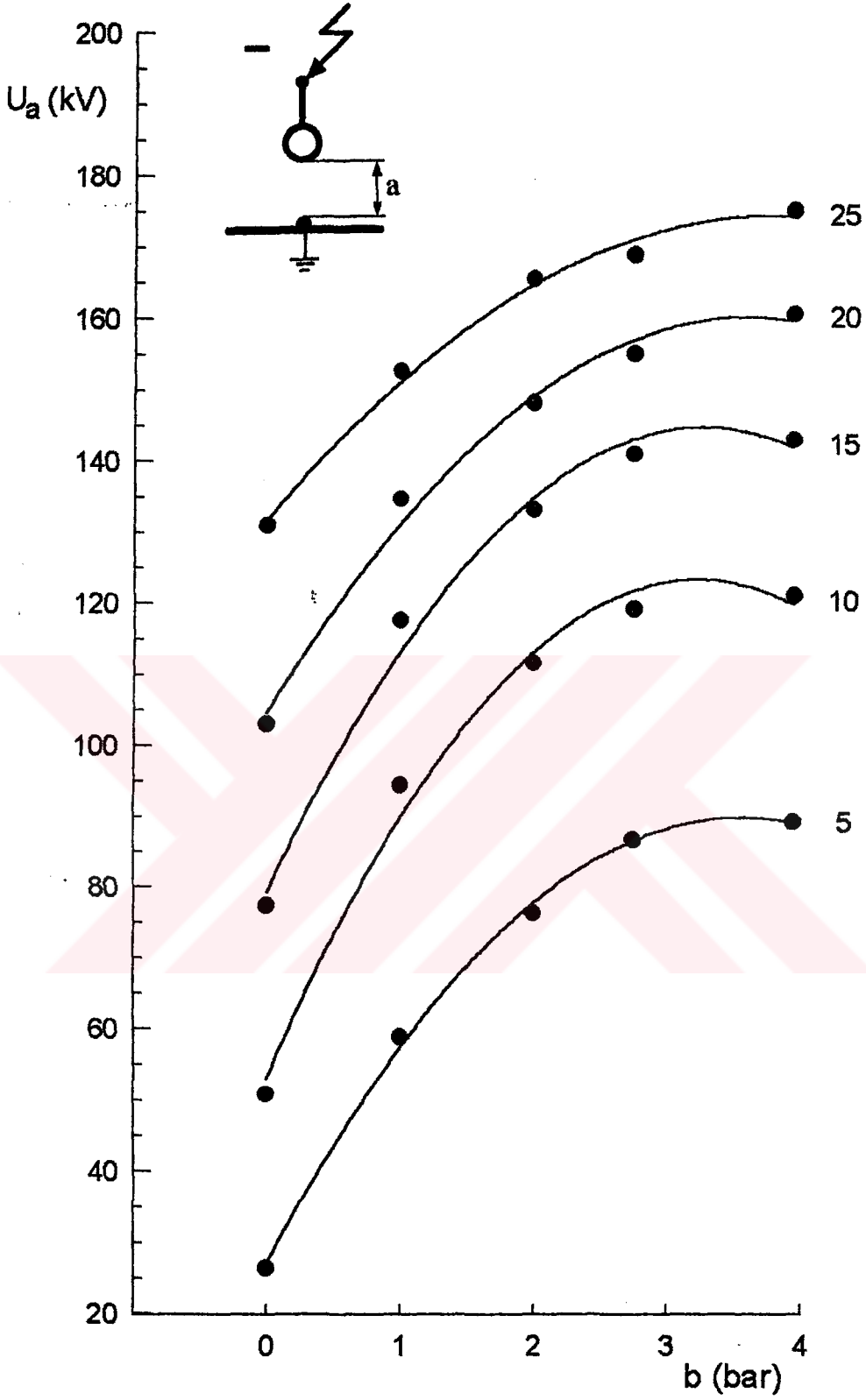
Şekil 5.53. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



Şekil 5.54. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi.



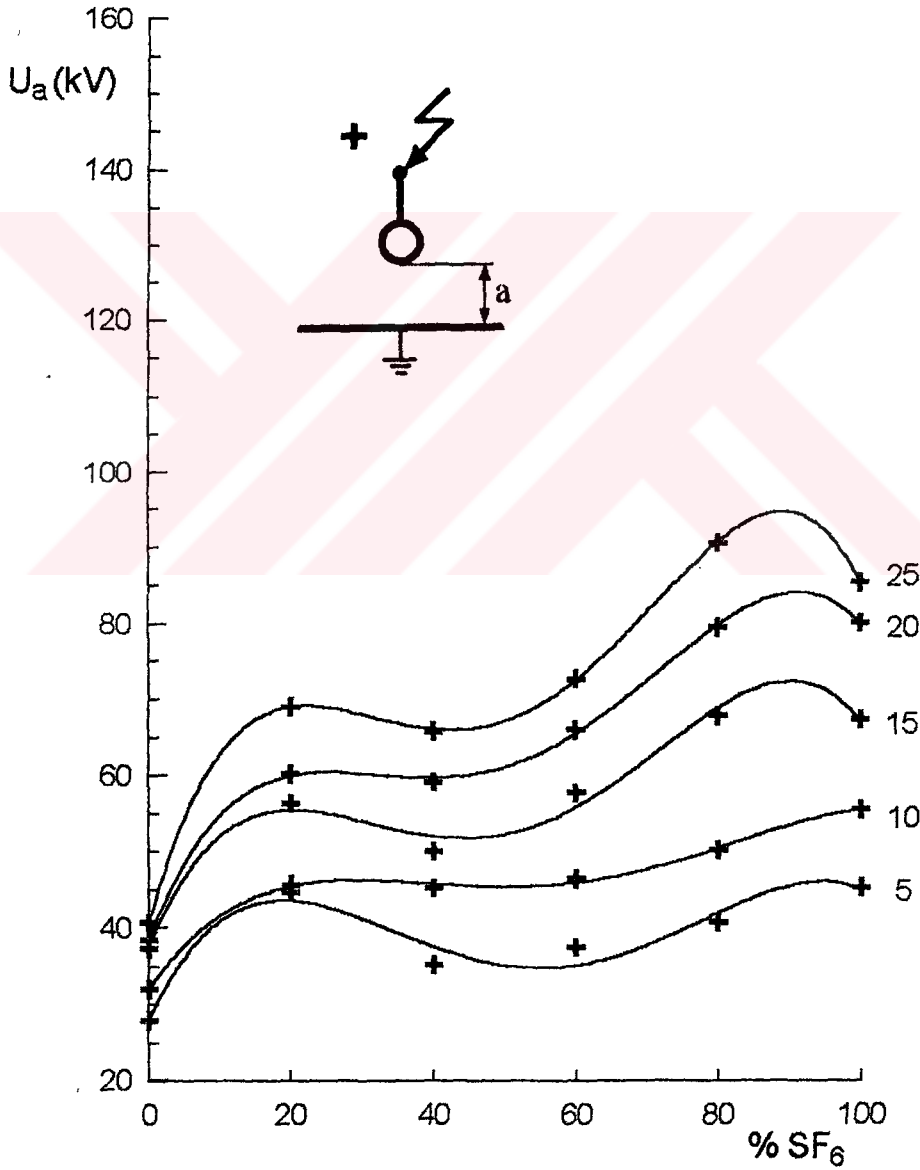
Şekil 5.55. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



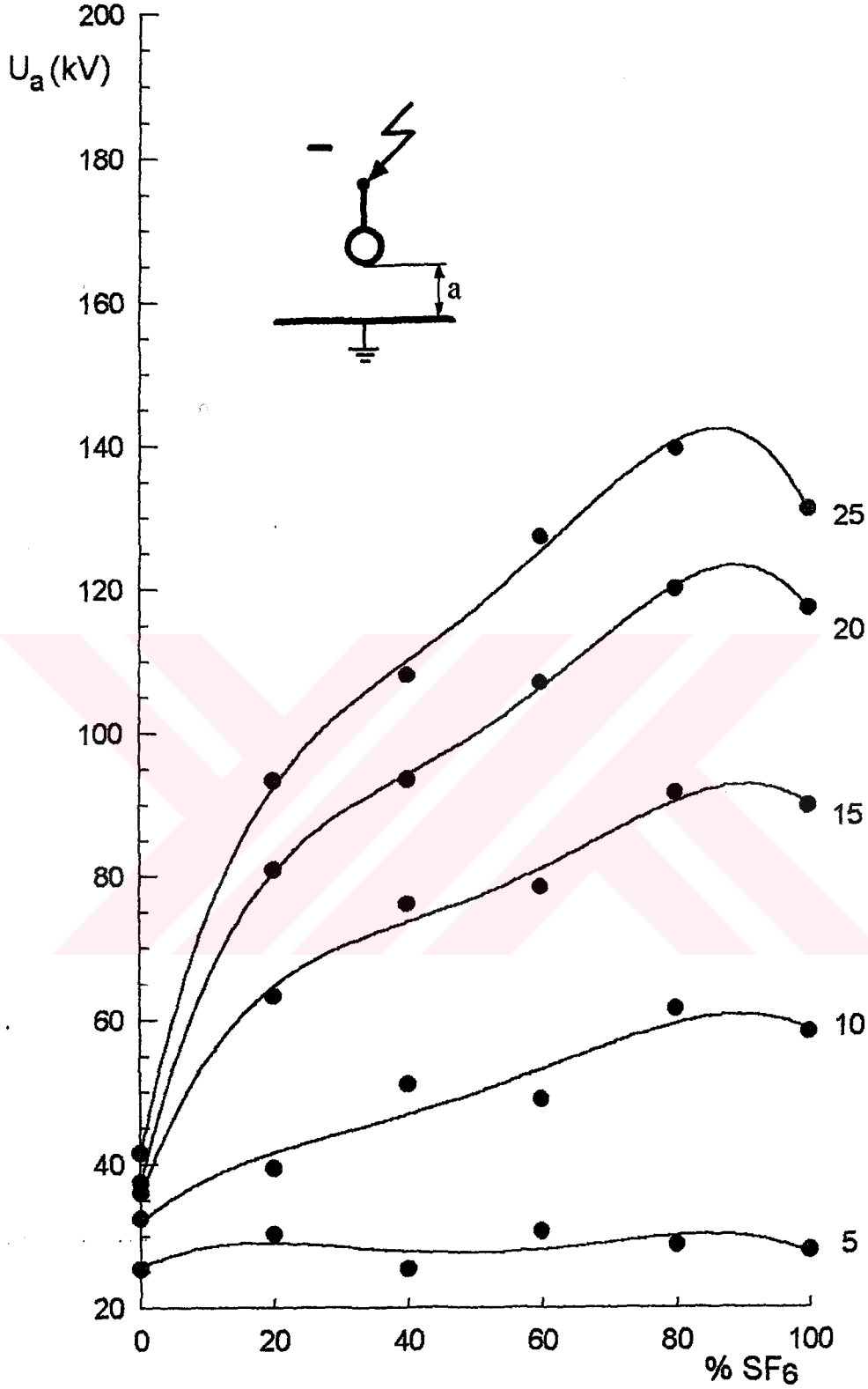
Şekil 5.56. %80 SF_6 + %20 N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.3. Sabit Basıncıta Farklı Elektrot Açıklıklarında Darbe Delinme Geriliminin SF_6+N_2 Gaz Karışımındaki SF_6 Oranı ile Değişimi

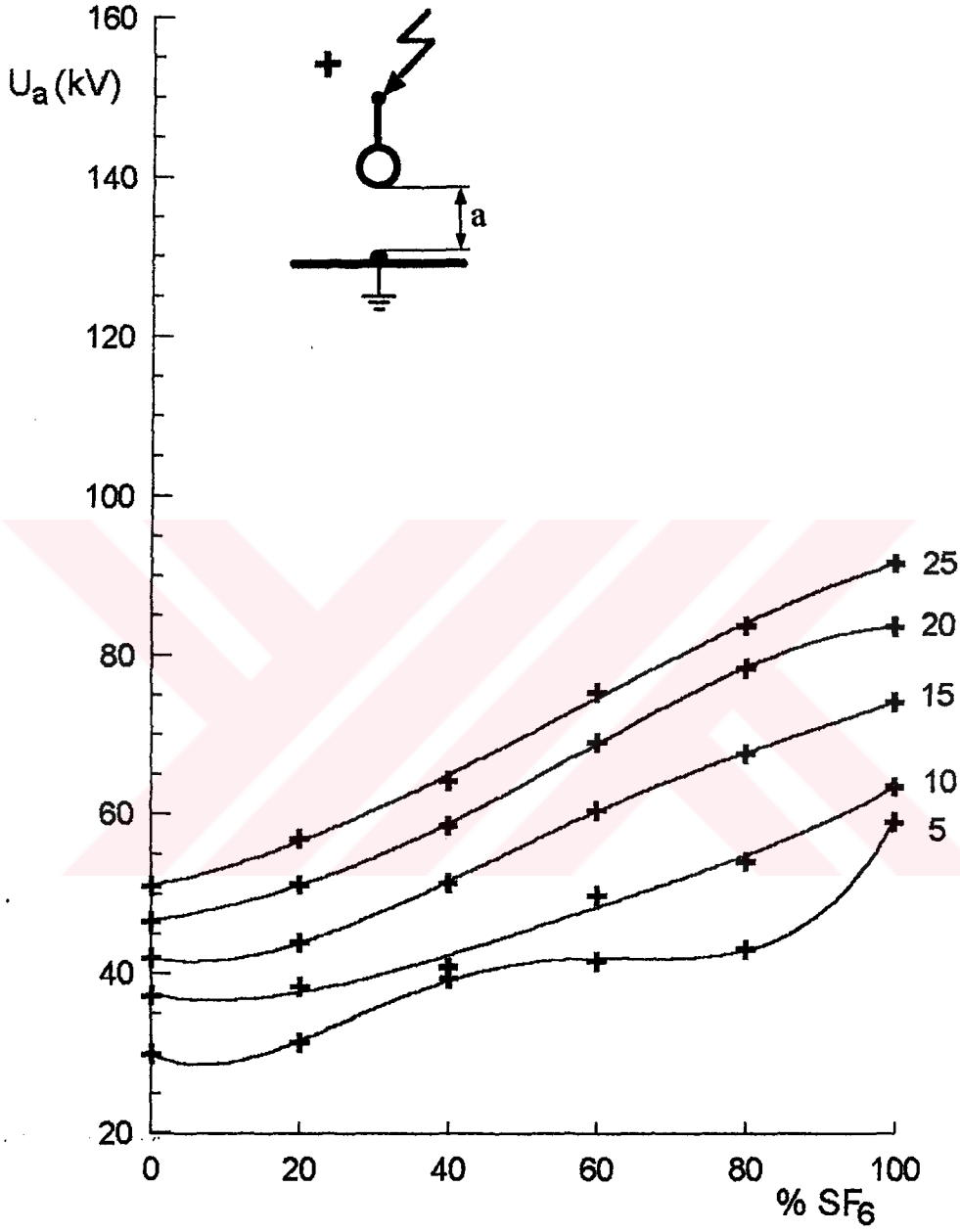
Bu alt bölümde de küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, beş farklı ($b=0-1-2-3-4$ bar) sabit basınçta, elektrot açıklığı parametre alınarak SF_6+N_2 gaz karışımında darbe delinme gerilimlerinin %0-100 arasındaki SF_6 oranı ile değişimleri verilmiştir. Şekil 5.57-5.60'da $b=0$ bar için, şekil 5.61-5.64'te $b=1$ bar için, şekil 5.65-5.68'de $b=2$ bar için, şekil 5.69-5.72'de $b=3$ bar için ve şekil 5.73-5.76'da $b=4$ bar için elektrot açıklığı parametre alınarak $U_d=f(\%\text{SF}_6)$ eğrileri gösterilmiştir.



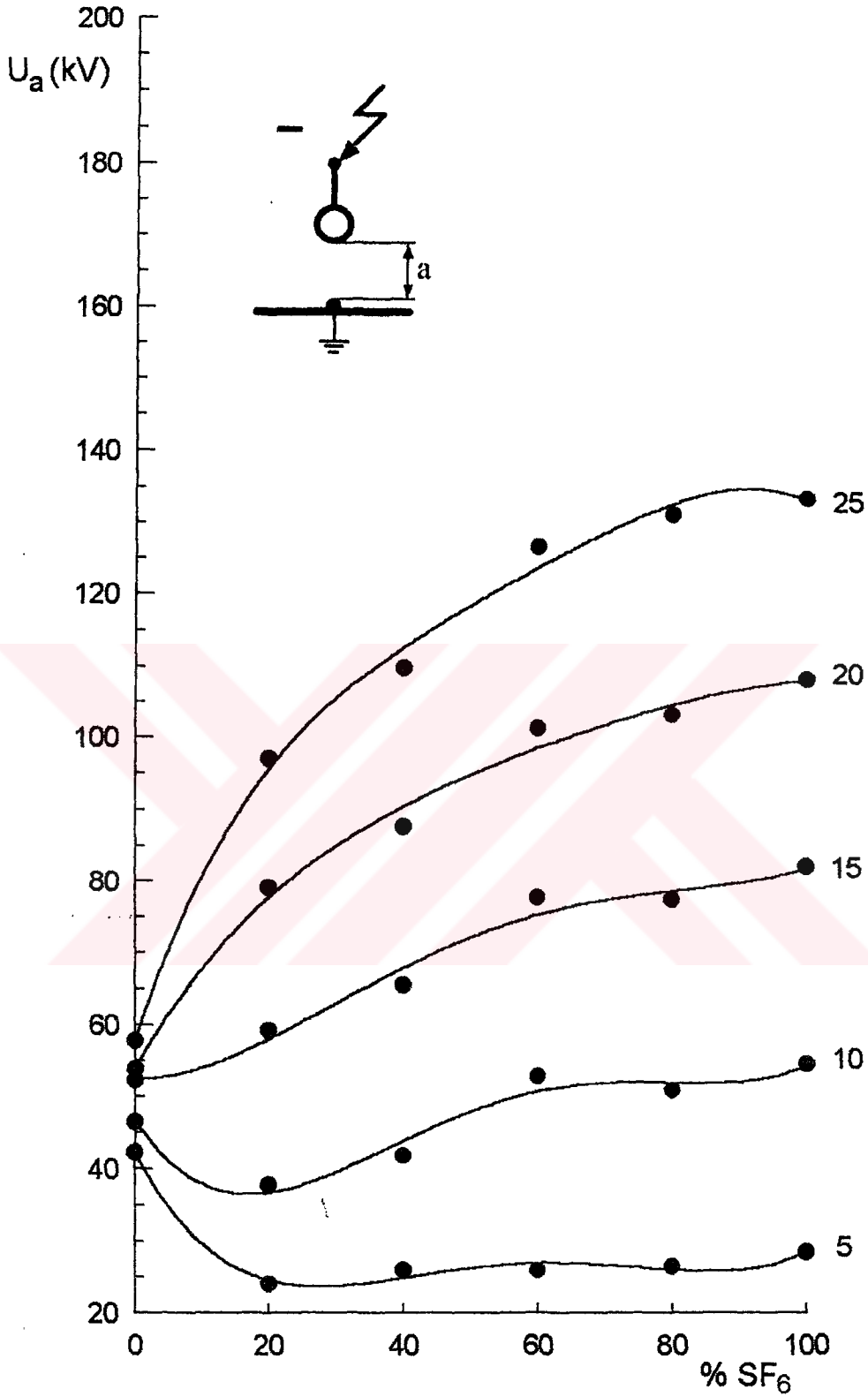
Şekil 5.57. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımındaki SF_6 oranı ile değişimi.



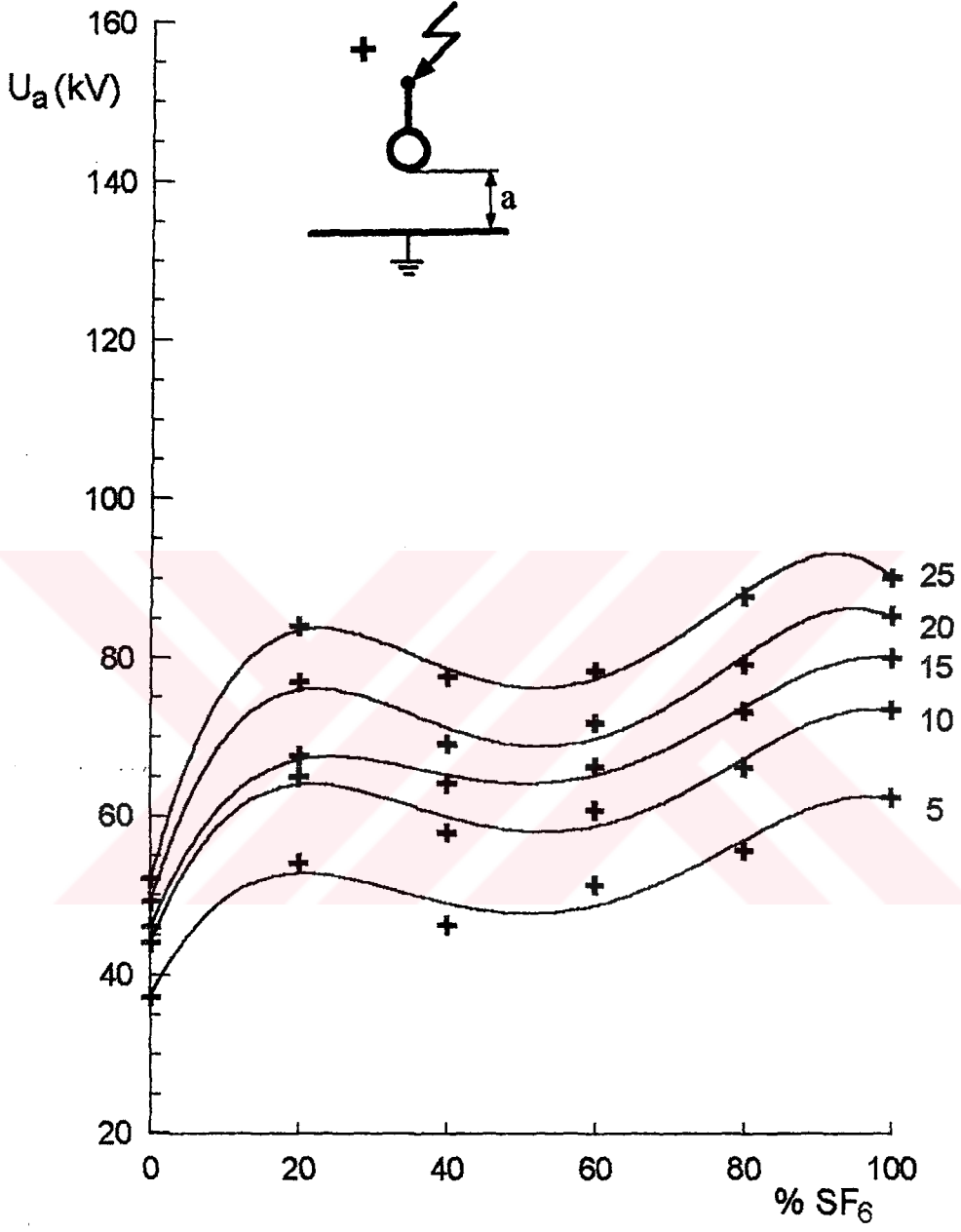
Şekil 5.58. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



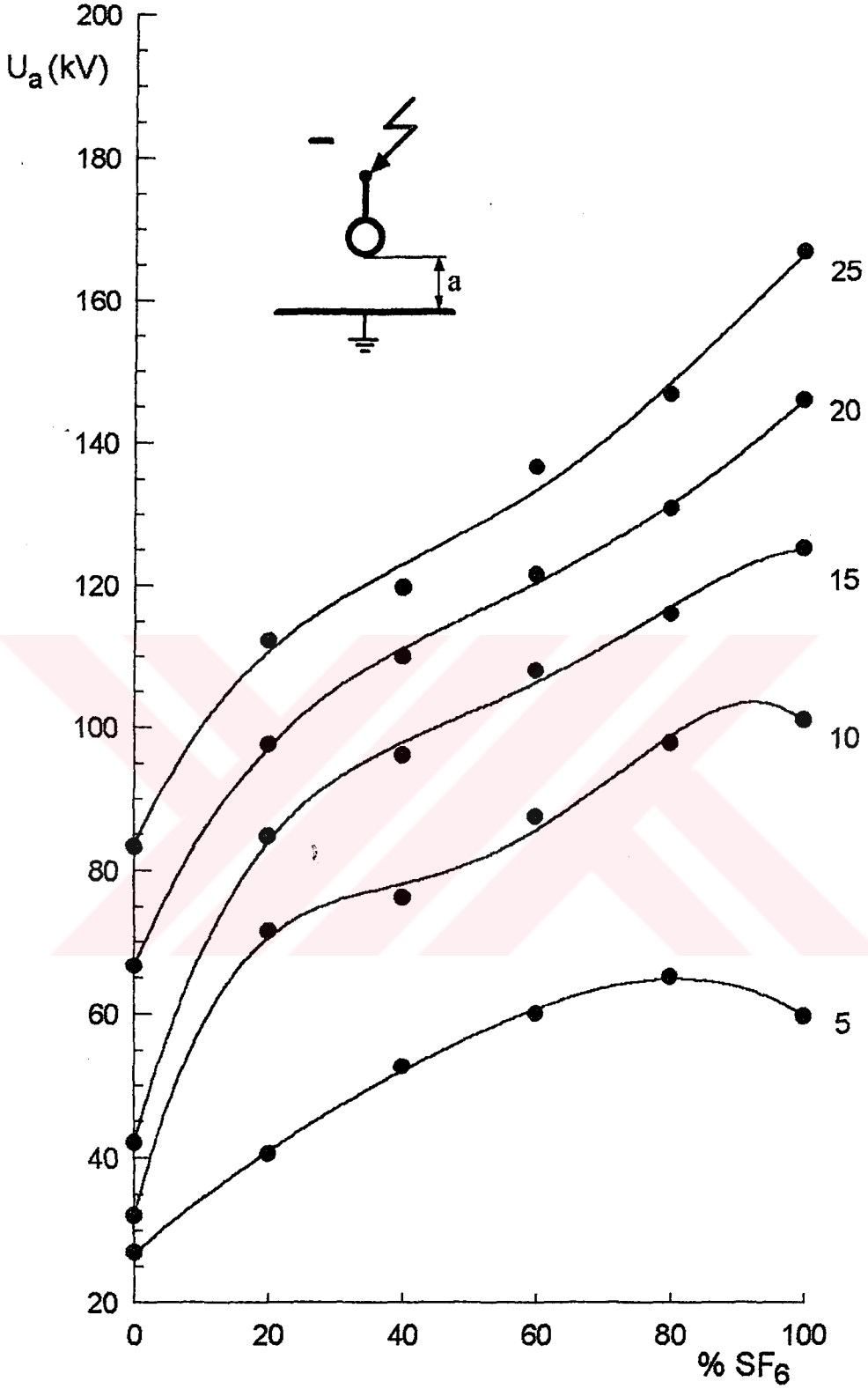
Şekil 5.59. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



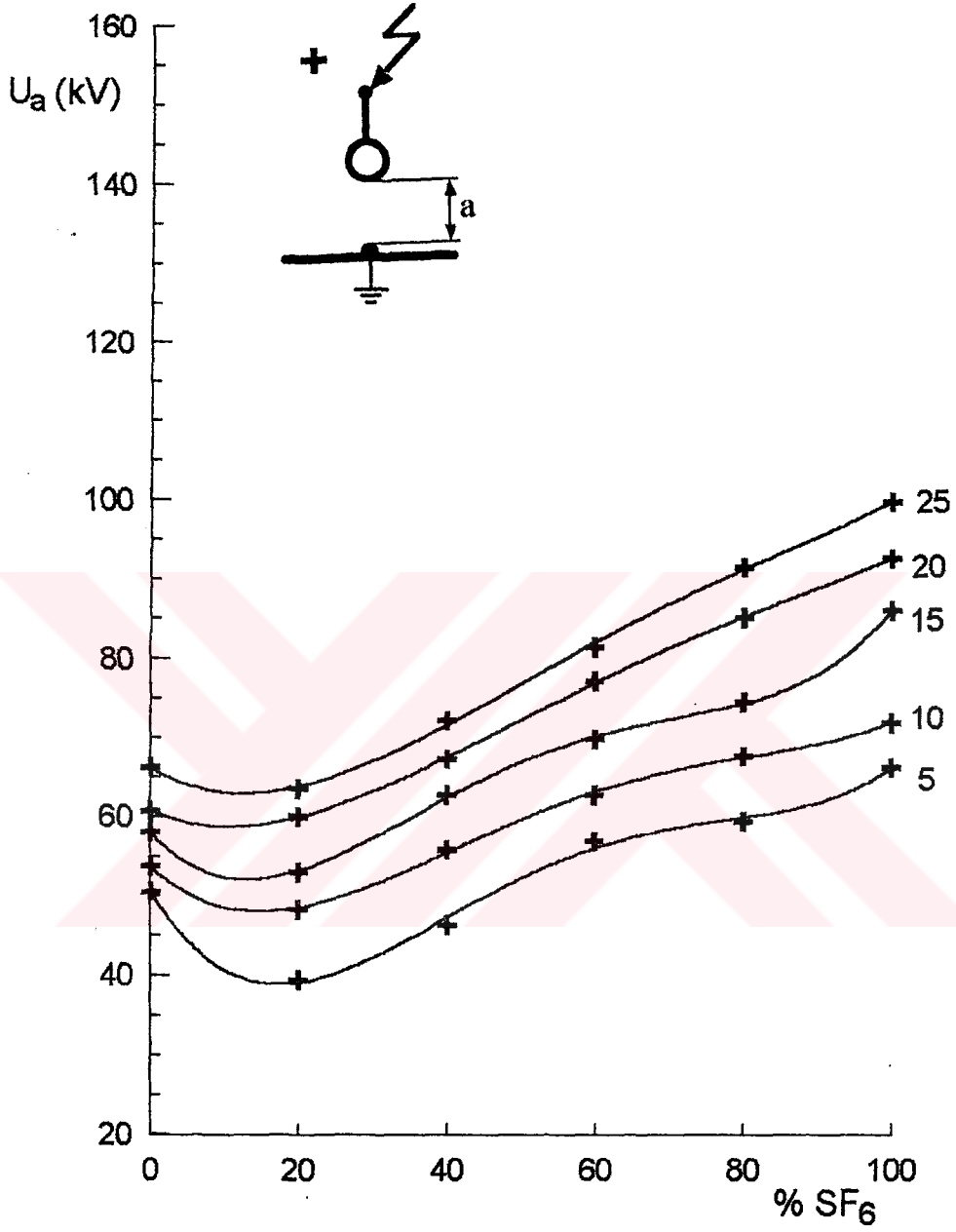
Şekil 5.60. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



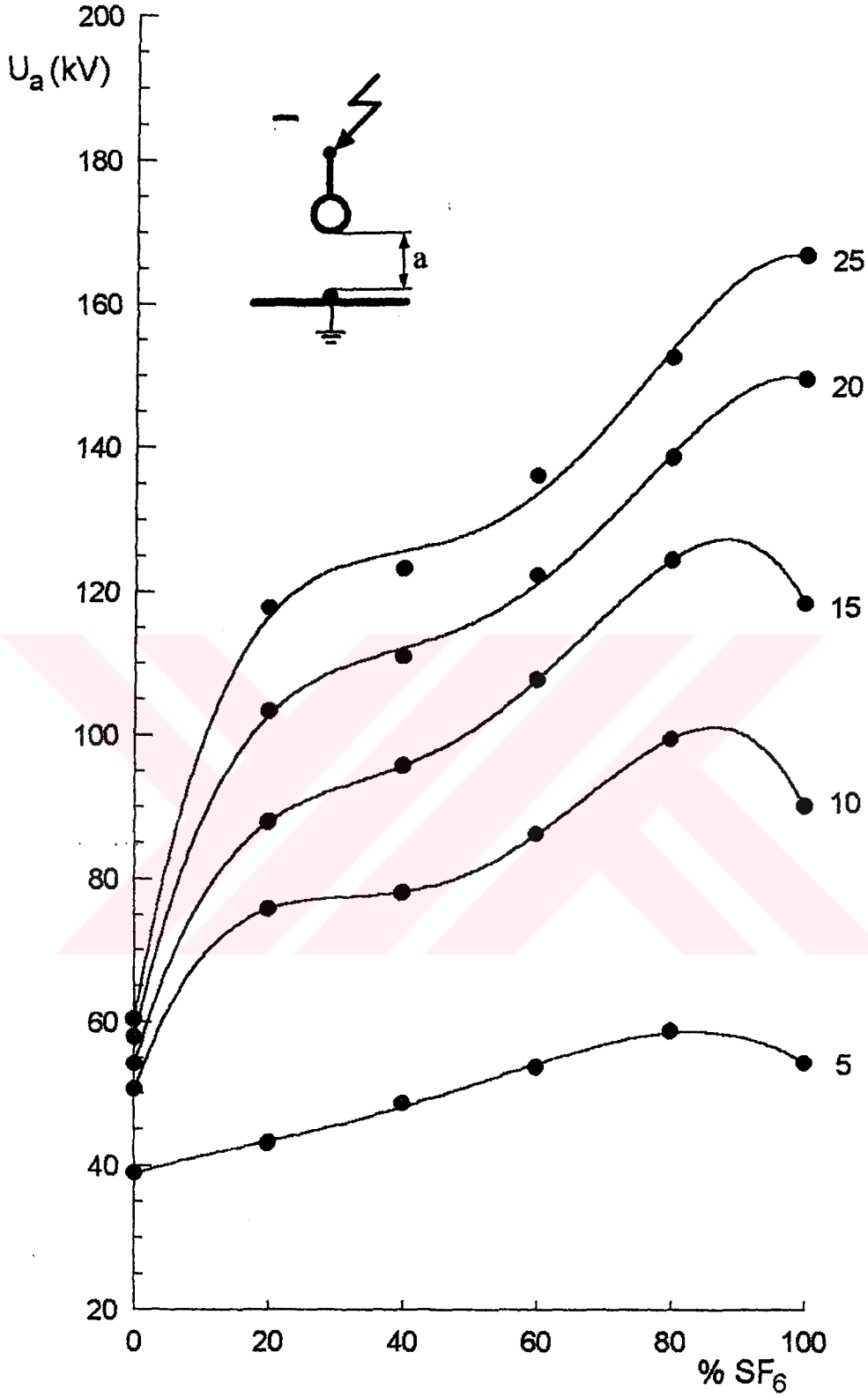
Şekil 5.61. $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 1 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



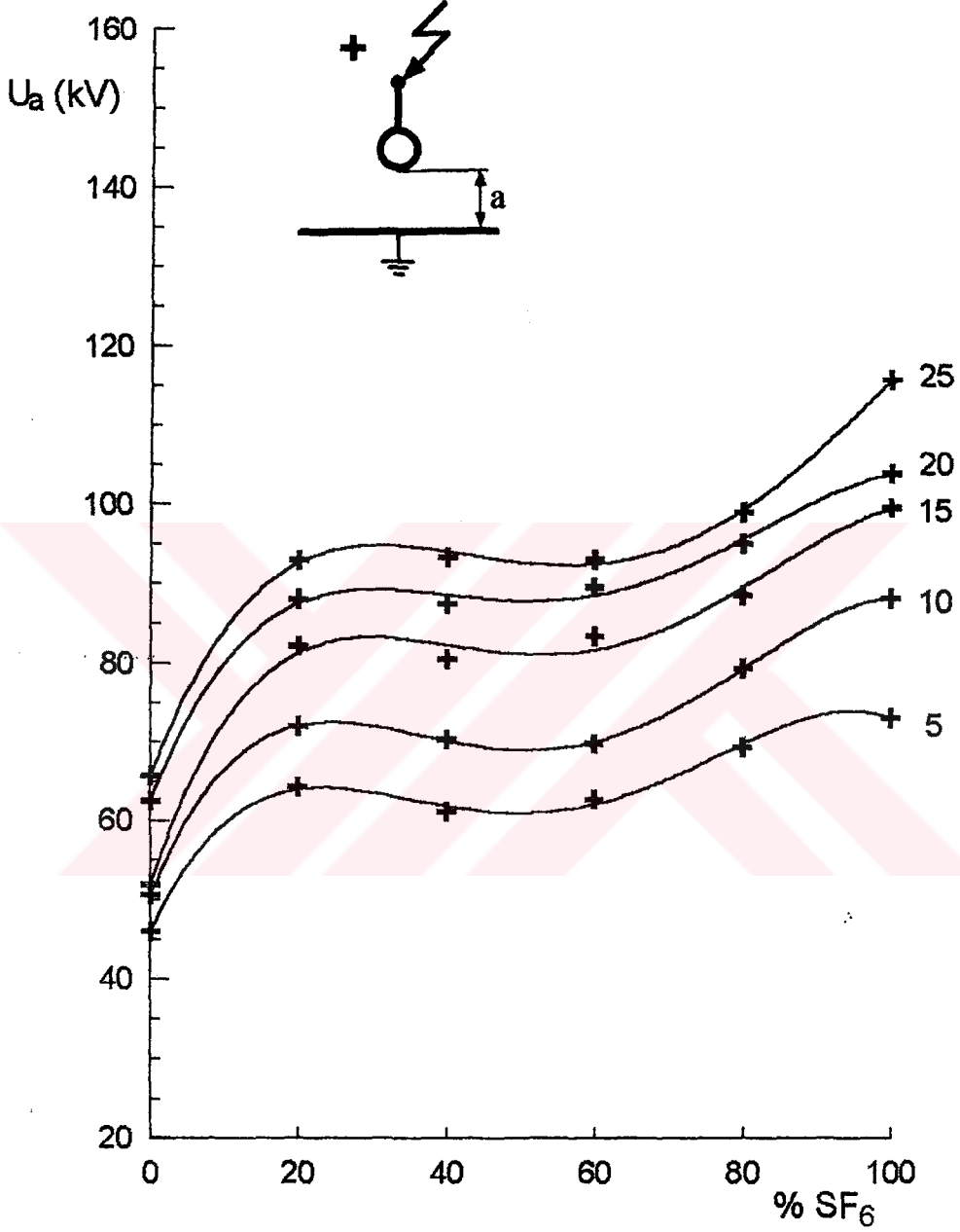
Şekil 5.62. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 1 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



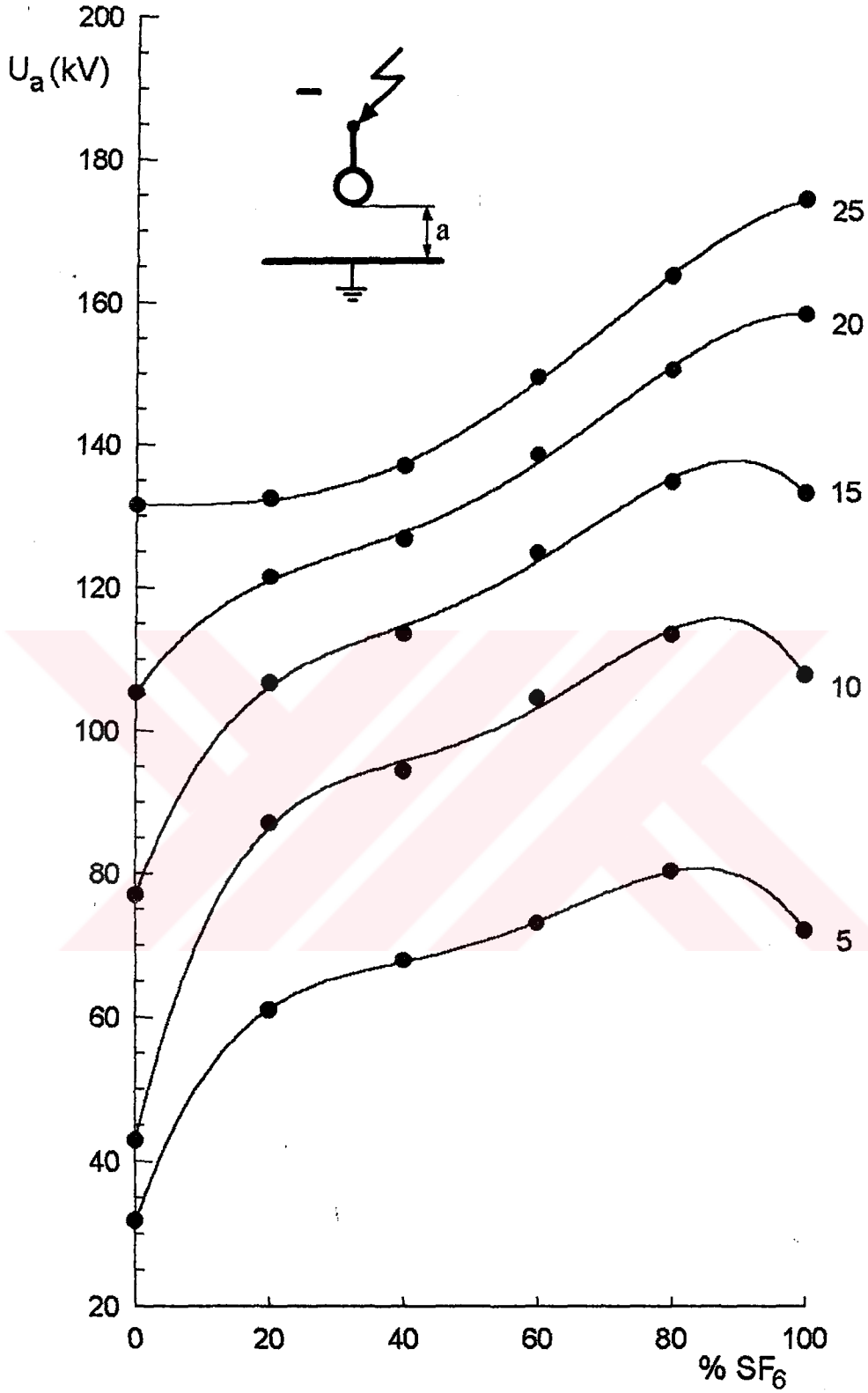
Şekil 5.63. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 1 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



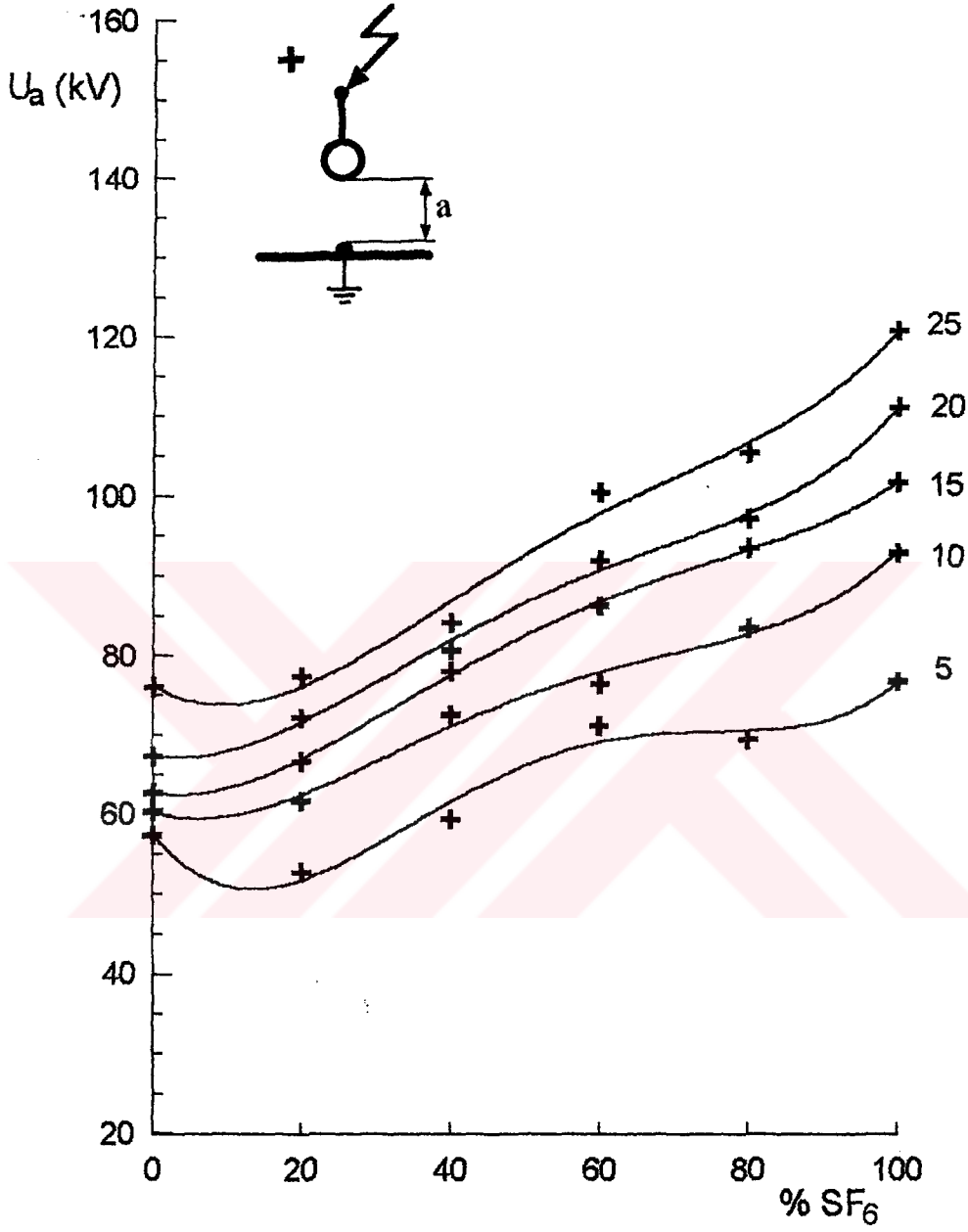
Şekil 5.64. SF₆+N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 1 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF₆ oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



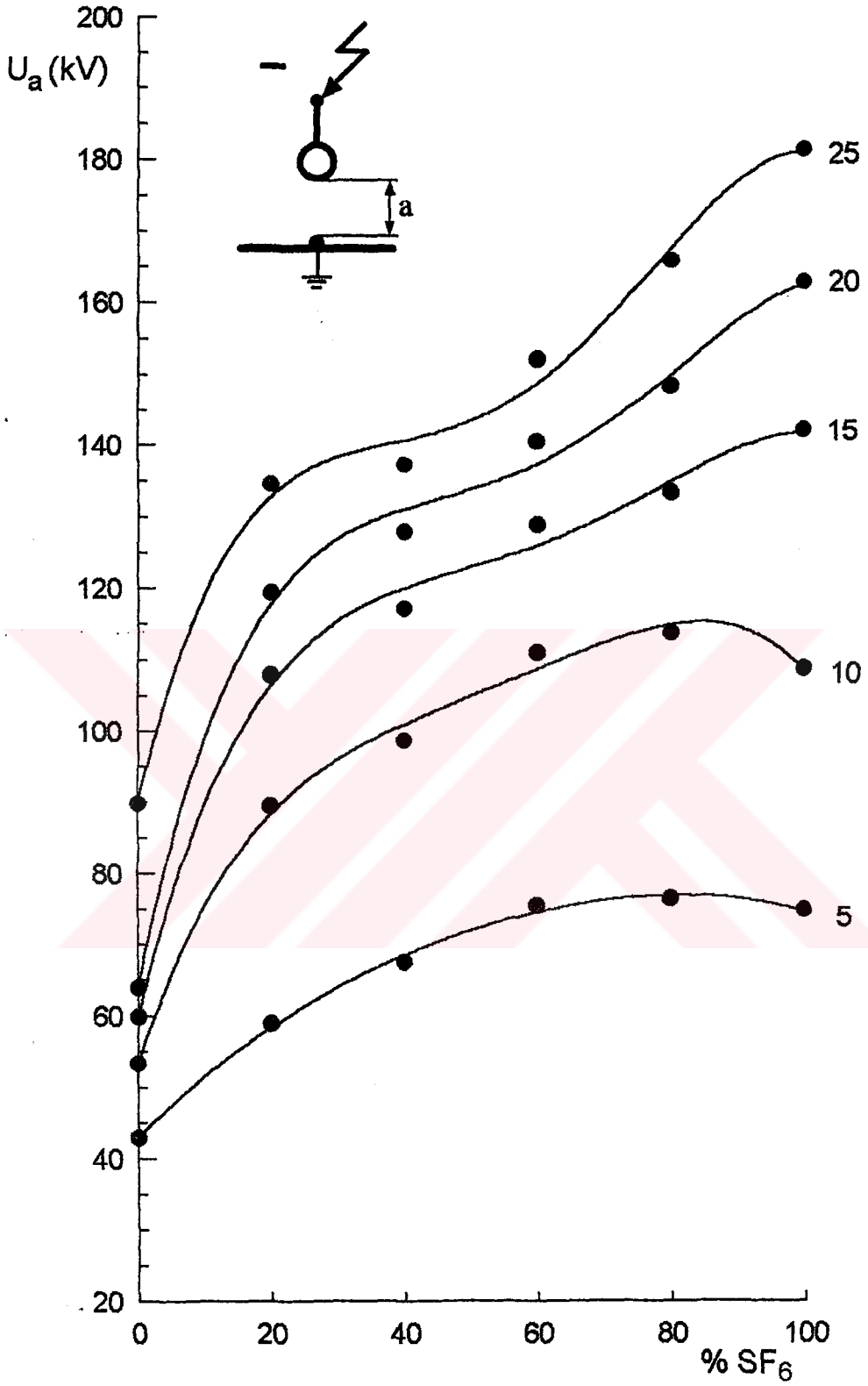
Şekil 5.65. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 2 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



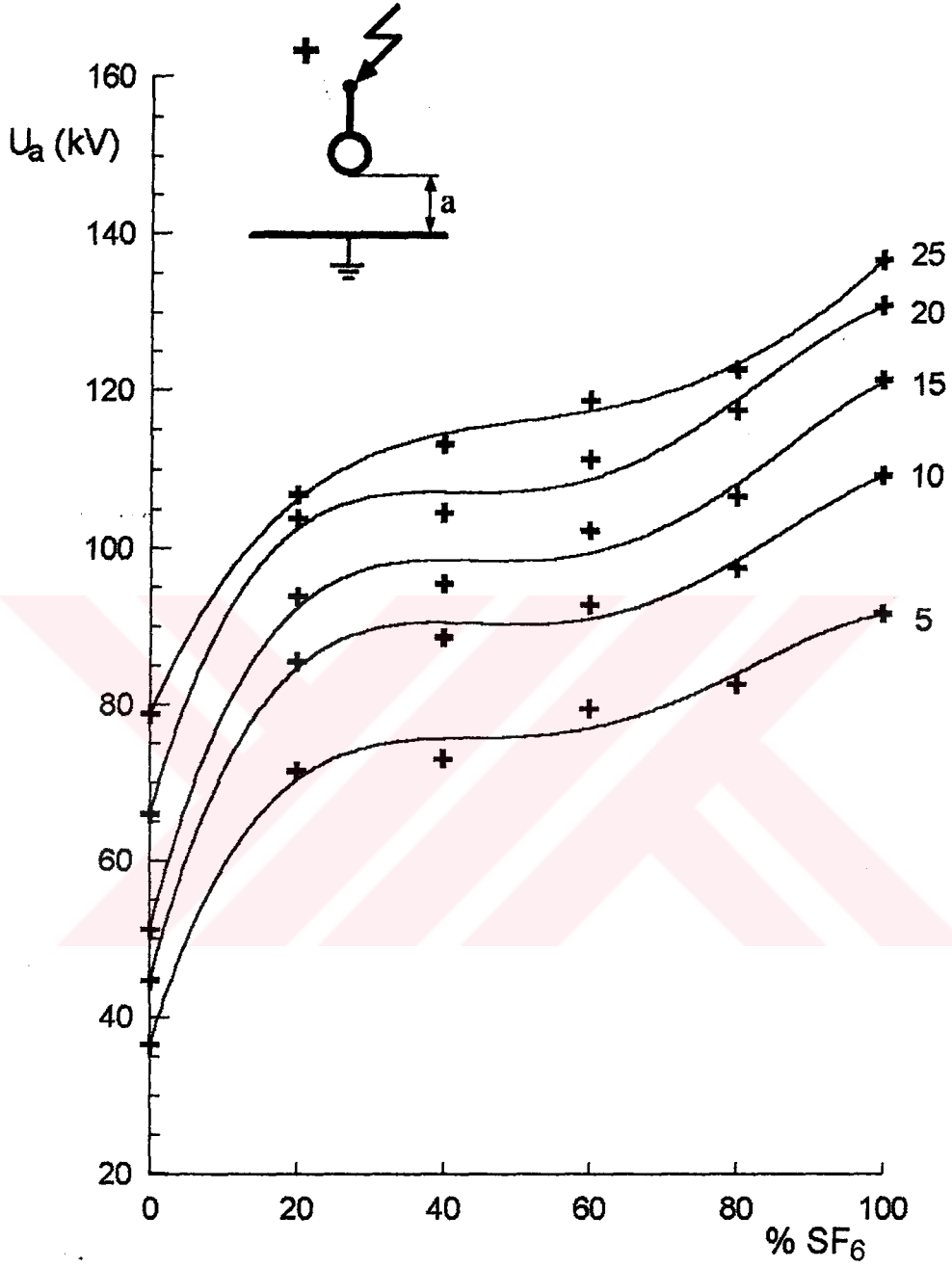
Şekil 5.66. SF₆+N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 2 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF₆ oranı ile değişimi.



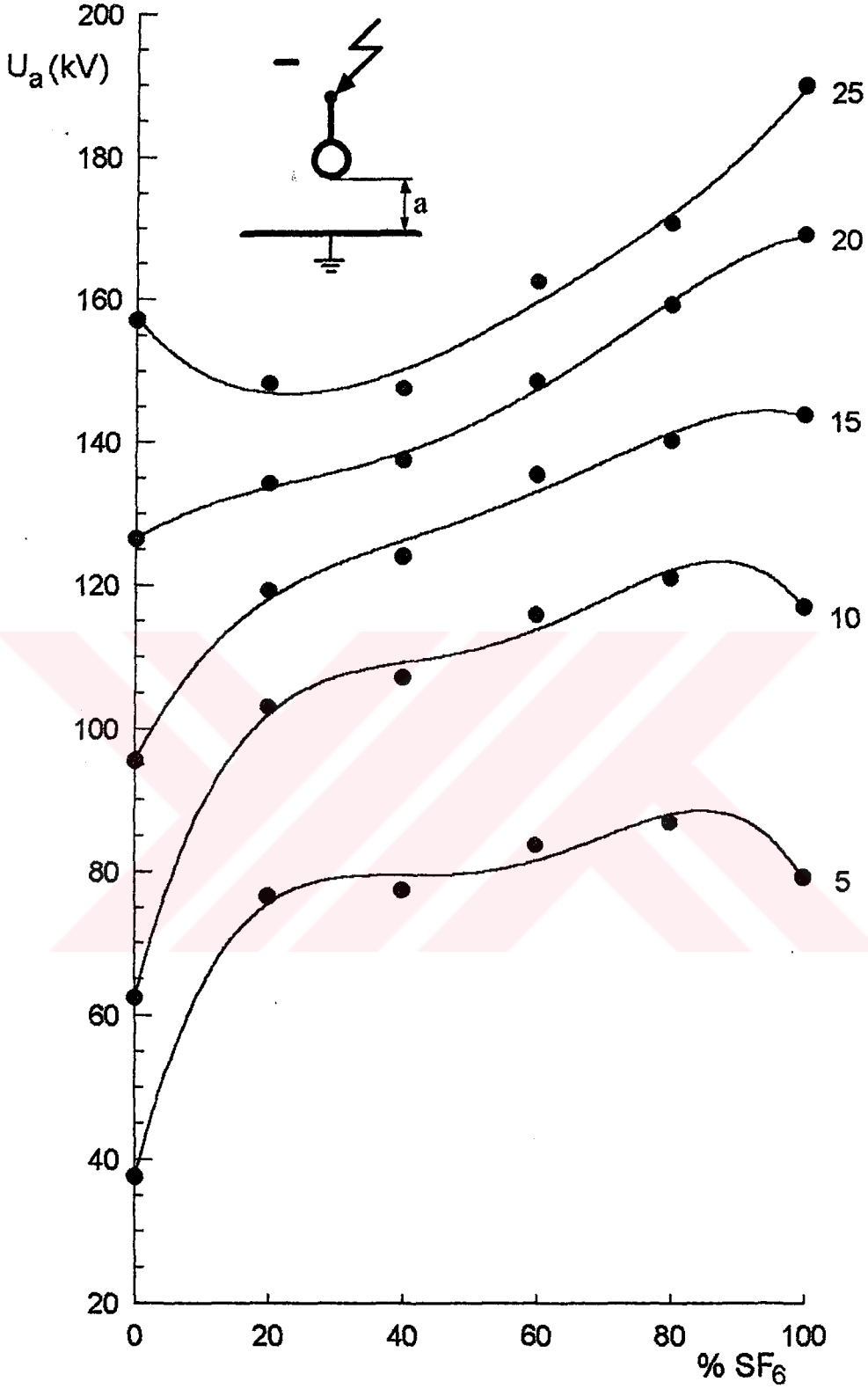
Şekil 5.67. SF₆+N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 2 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF₆ oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



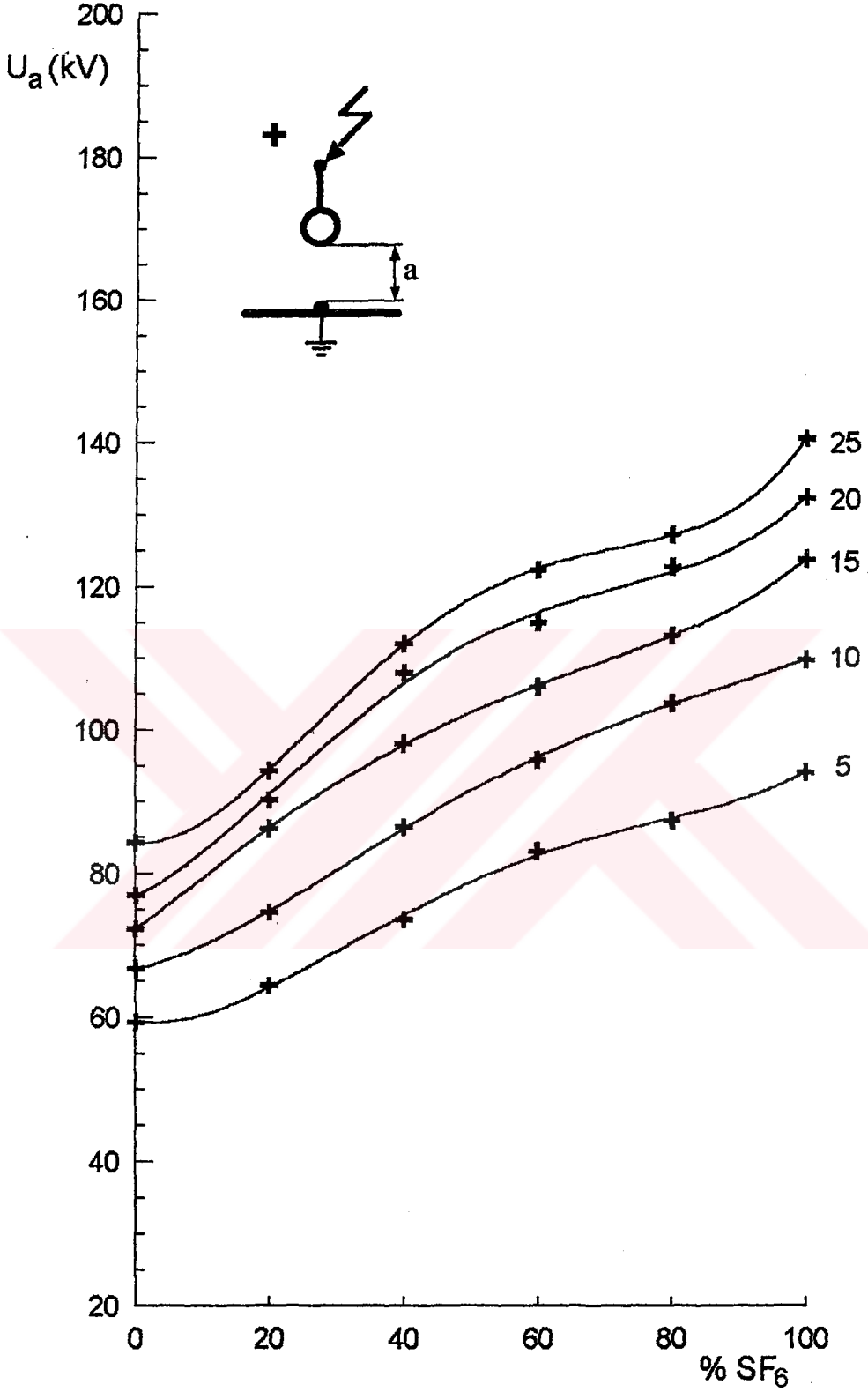
Şekil 5.68. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 2 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



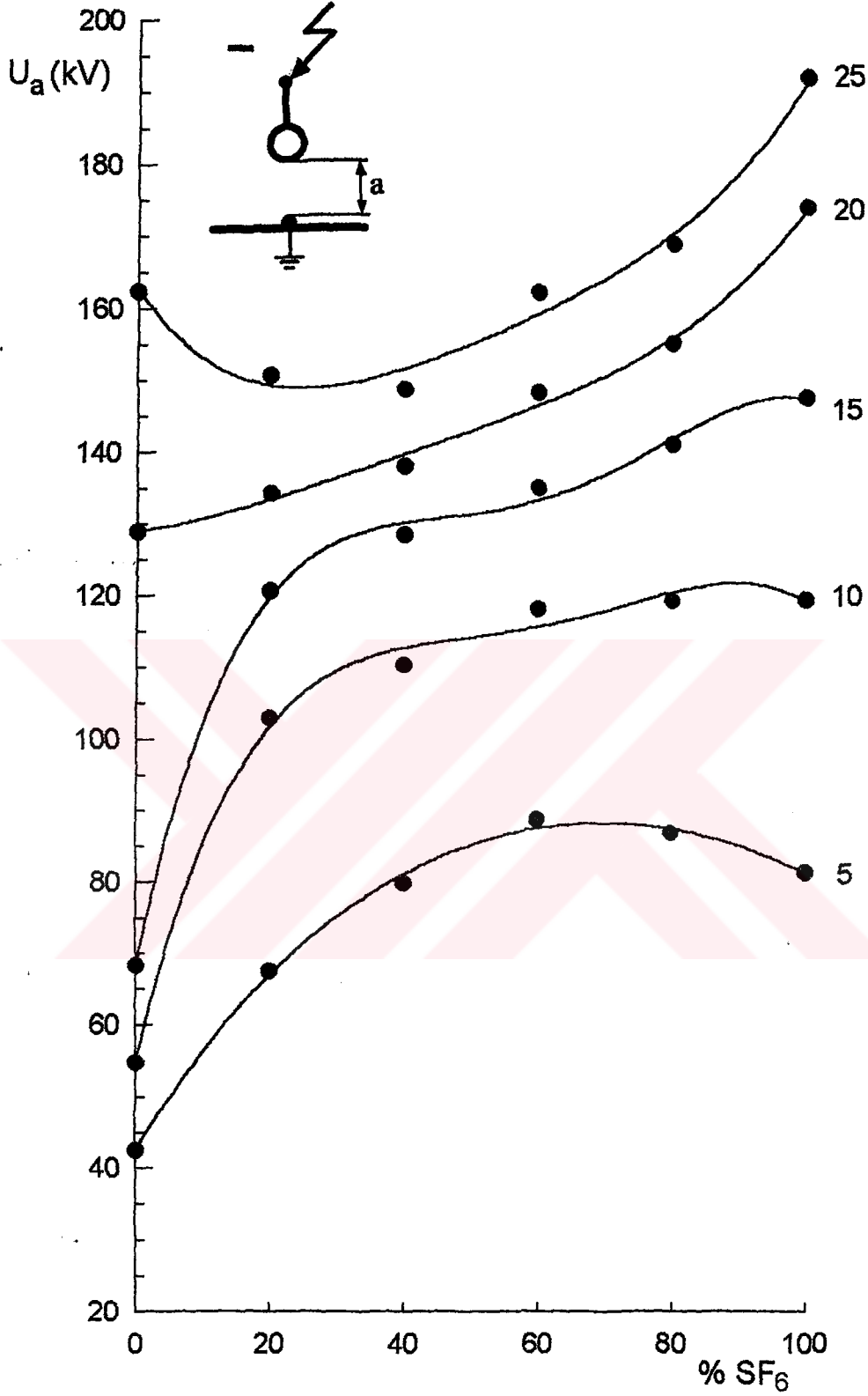
Şekil 5.69. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 3 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımındaki SF_6 oranı ile değişimi.



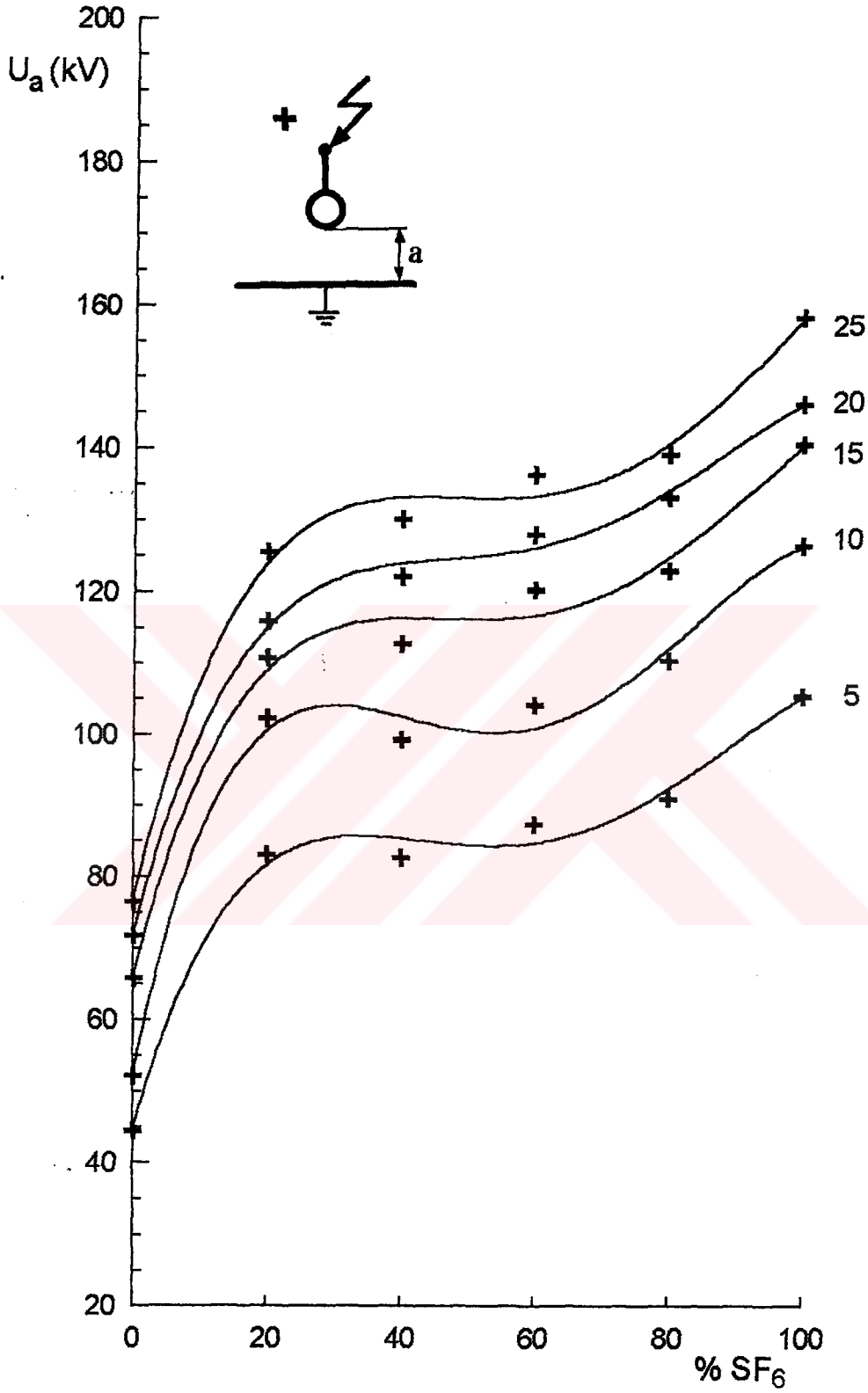
Şekil 5.70. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 3 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



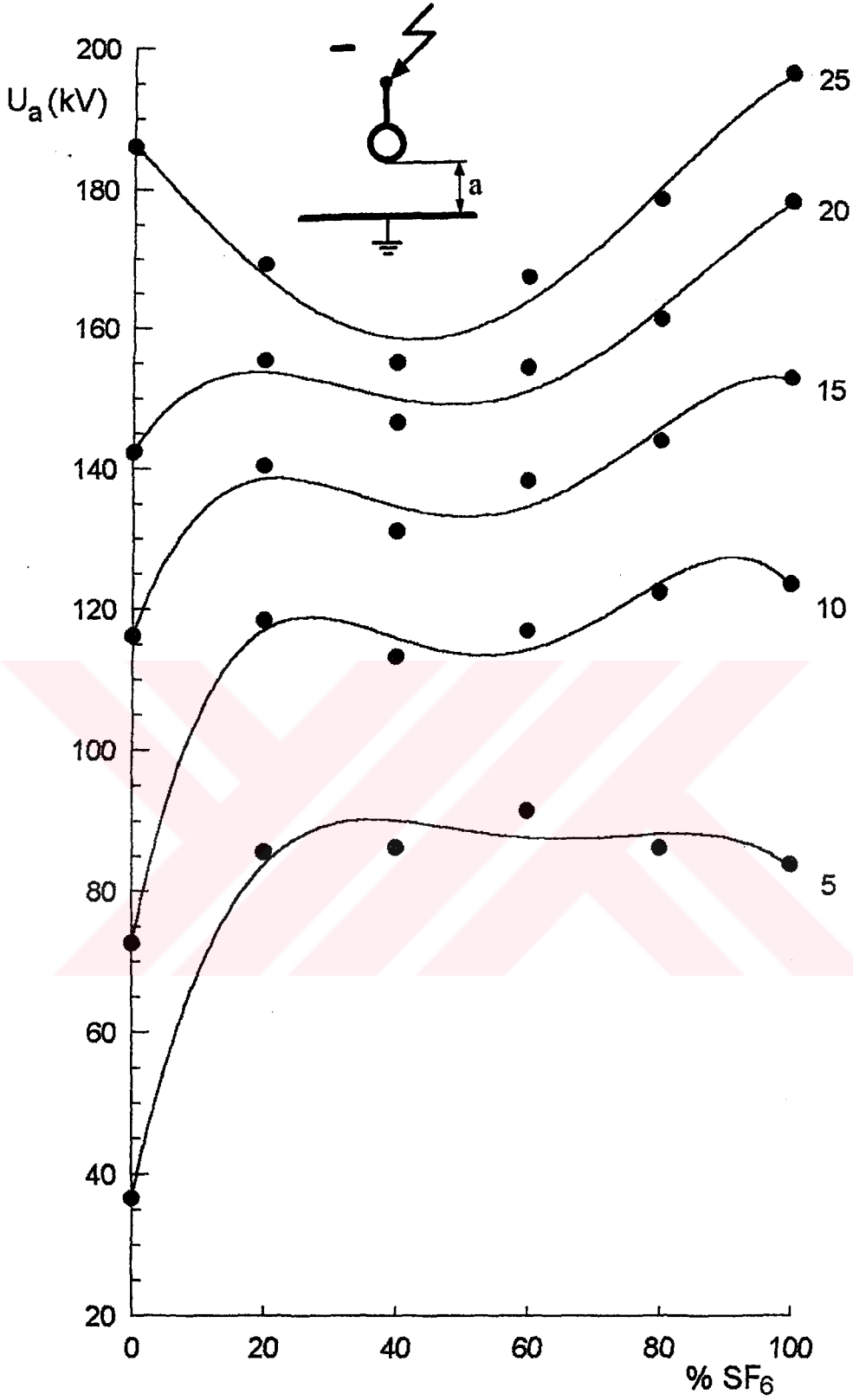
Şekil 5.71. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 3 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



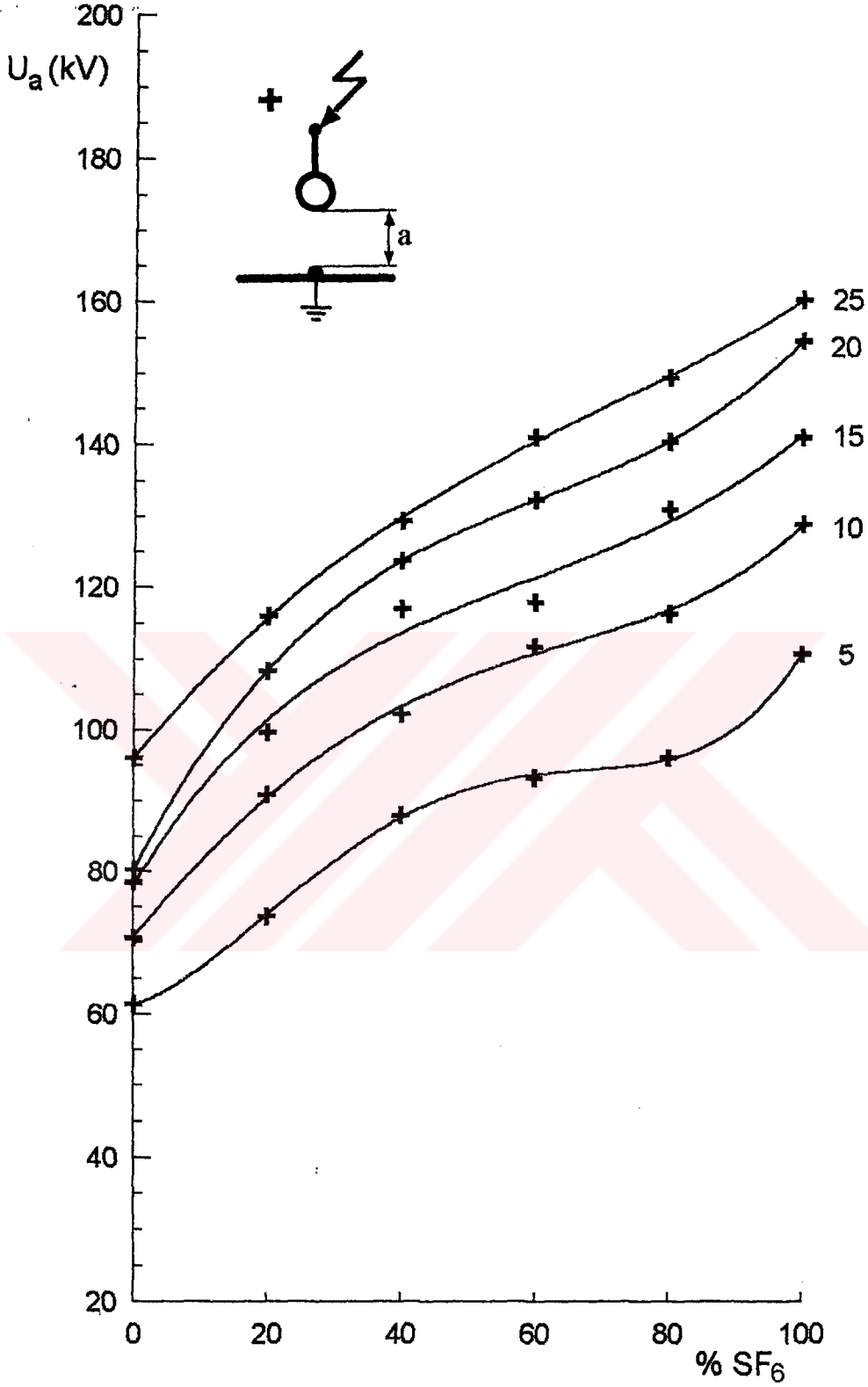
Şekil 5.72. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 3 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



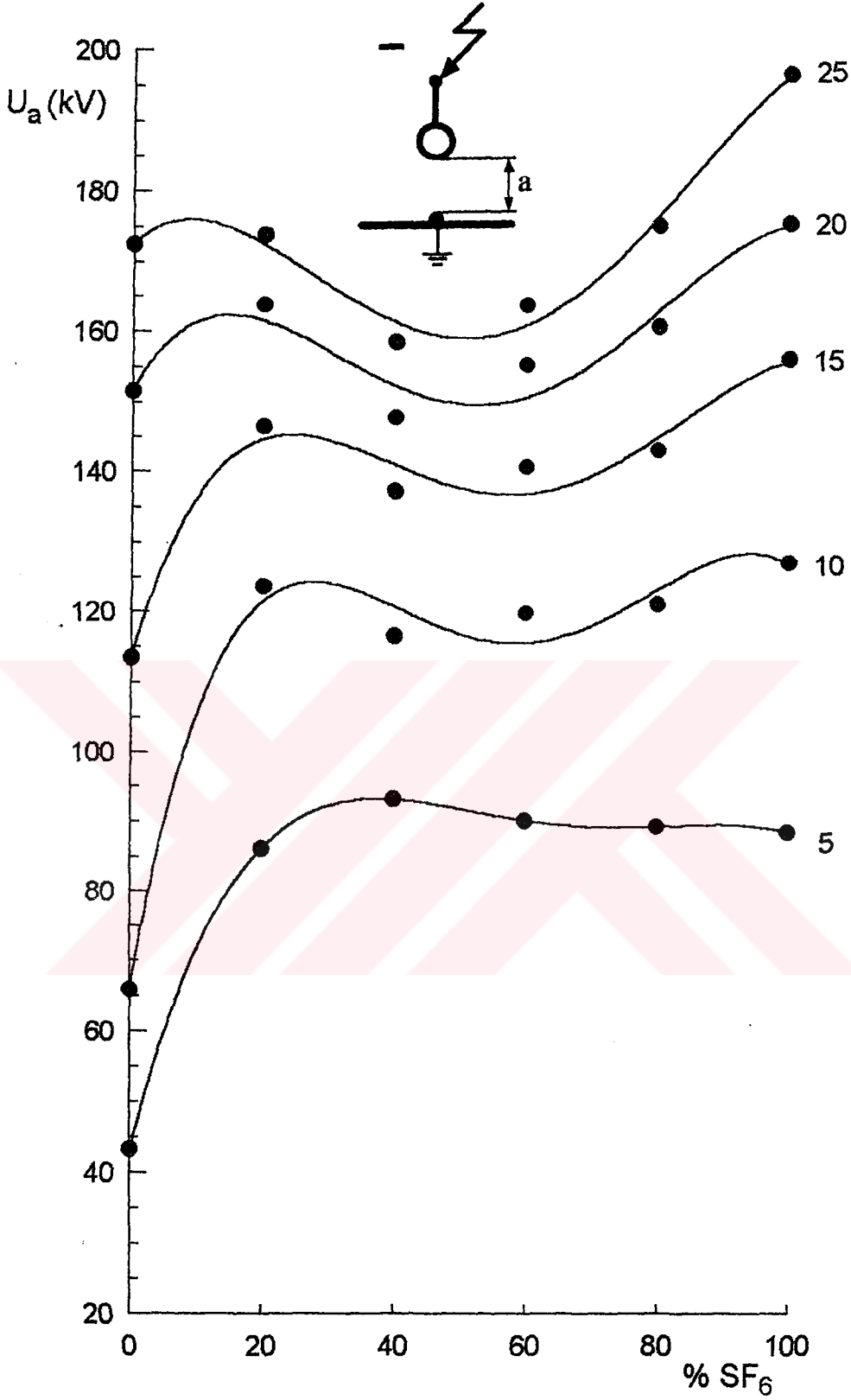
Şekil 5.73. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 4 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



Şekil 5.74. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 4 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



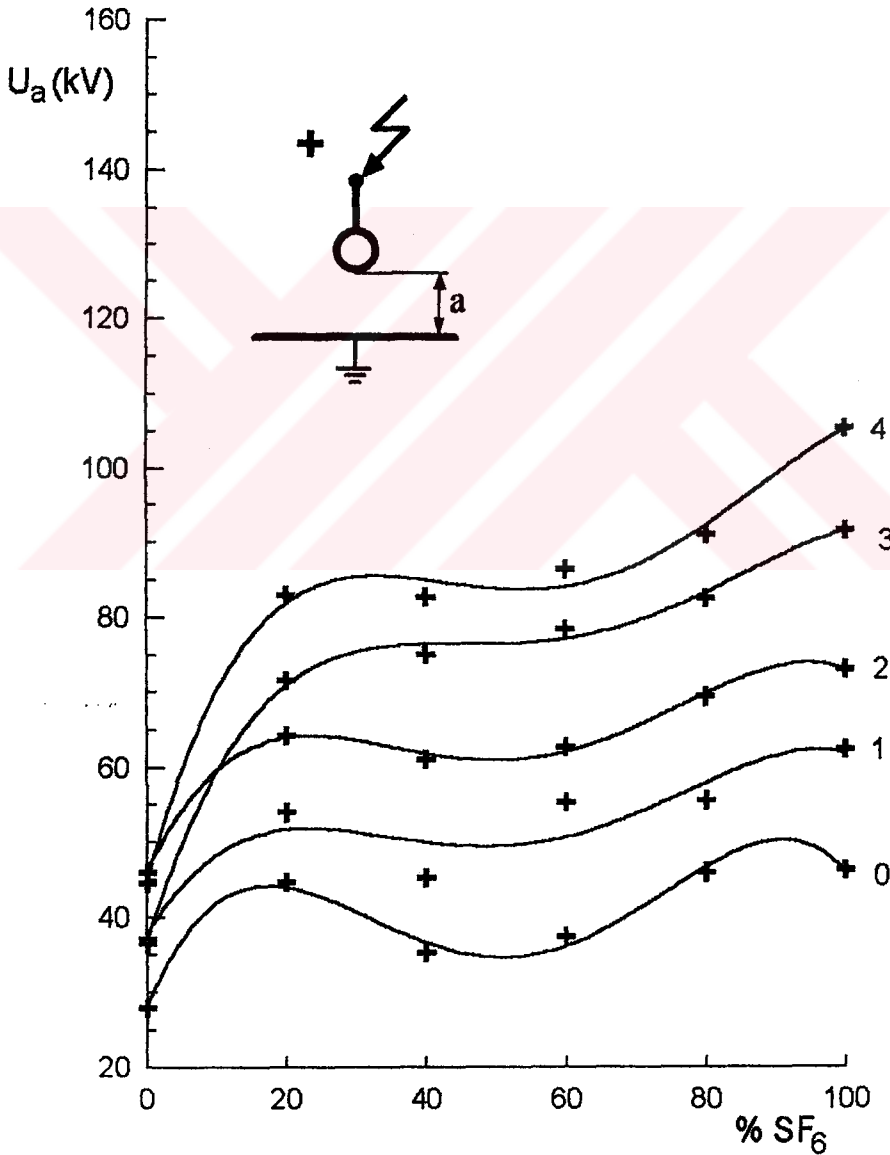
Şekil 5.75. $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 4 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



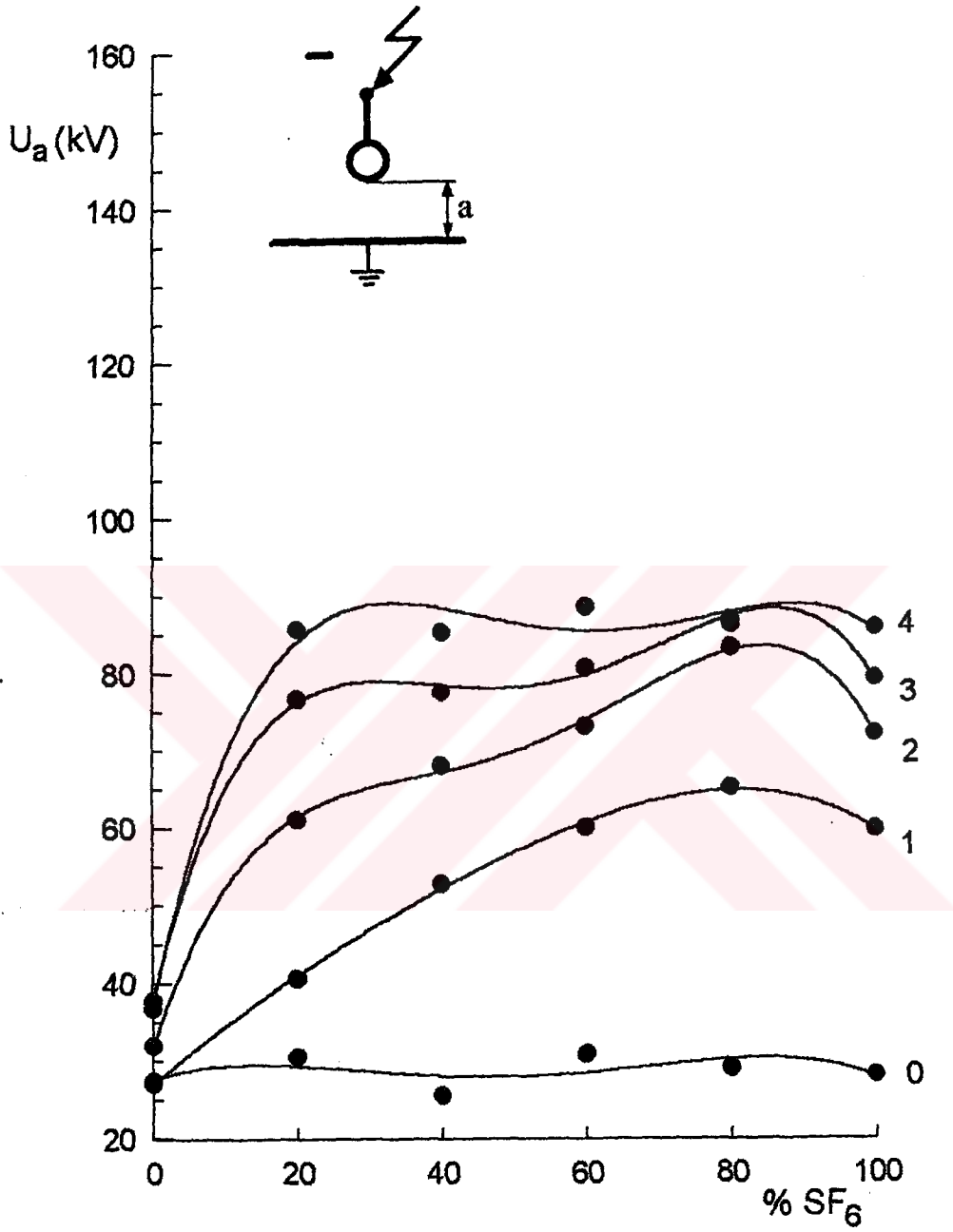
Şekil 5.76. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 4 bar basıncında, 5-25 mm elektrot açıklıklarında, negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

5.4. Sabit Elektrot Açıklığında Farklı Basınçlarda Darbe Delinme Geriliminin SF_6+N_2 Gaz Karışımındaki SF_6 Oranı ile Değişimi

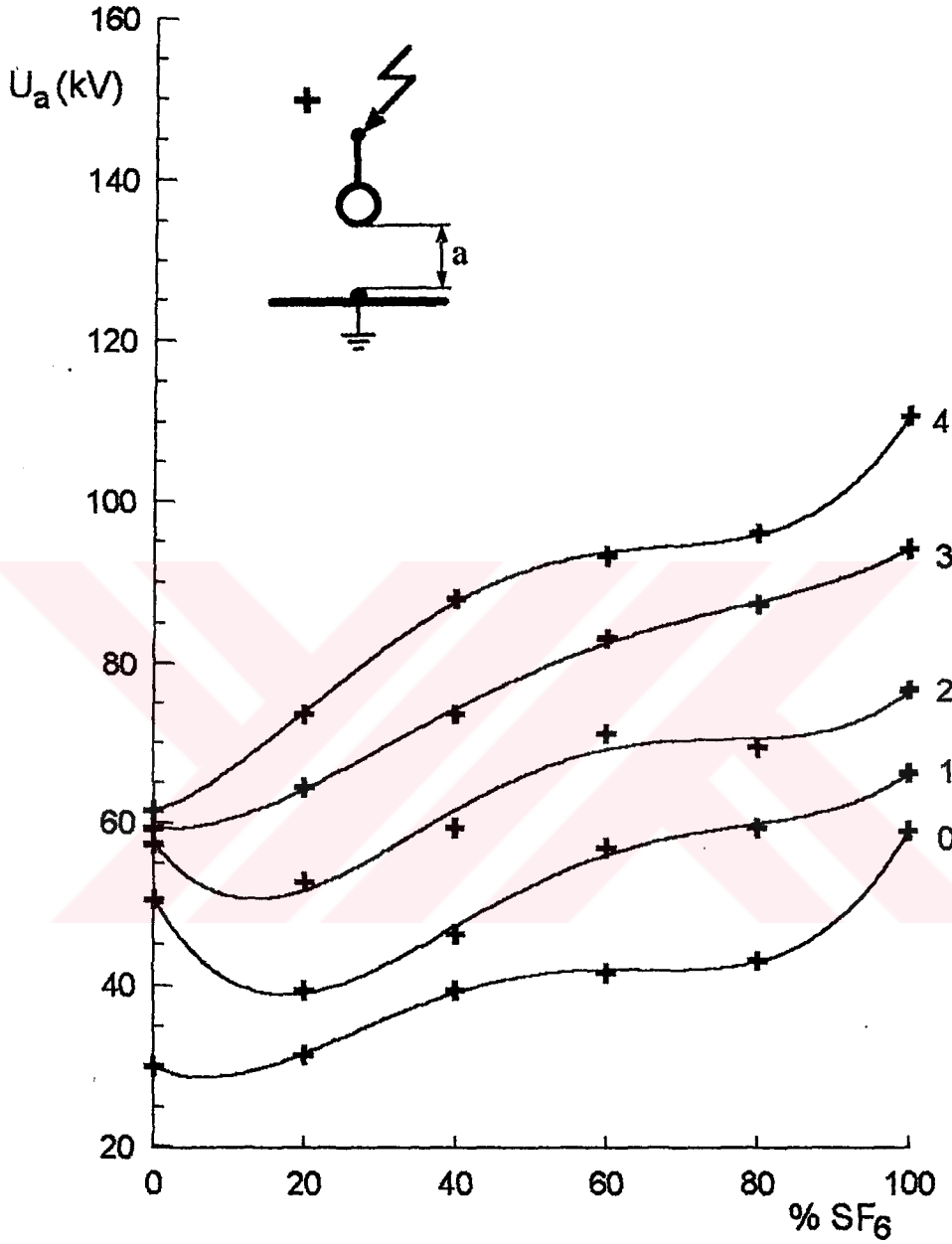
Bu alt bölümde, küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, beş farklı ($a=5-10-15-20-25$ mm) sabit elektrot açıklığında, basınç parametre alınarak SF_6+N_2 gaz karışımında darbe delinme gerilimlerinin %0-100 arasındaki SF_6 oranı ile değişimleri verilmiştir. Şekil 5.77-5.80'de $a=5$ mm için, şekil 5.81-5.84'te $a=10$ mm için, şekil 5.85-5.88'de $a=15$ mm için, şekil 5.89-5.92'de $a=20$ mm için ve şekil 5.93-5.96'da $a=25$ mm için basınç parametre alınarak $U_d=f(\%SF_6)$ eğrileri gösterilmiştir.



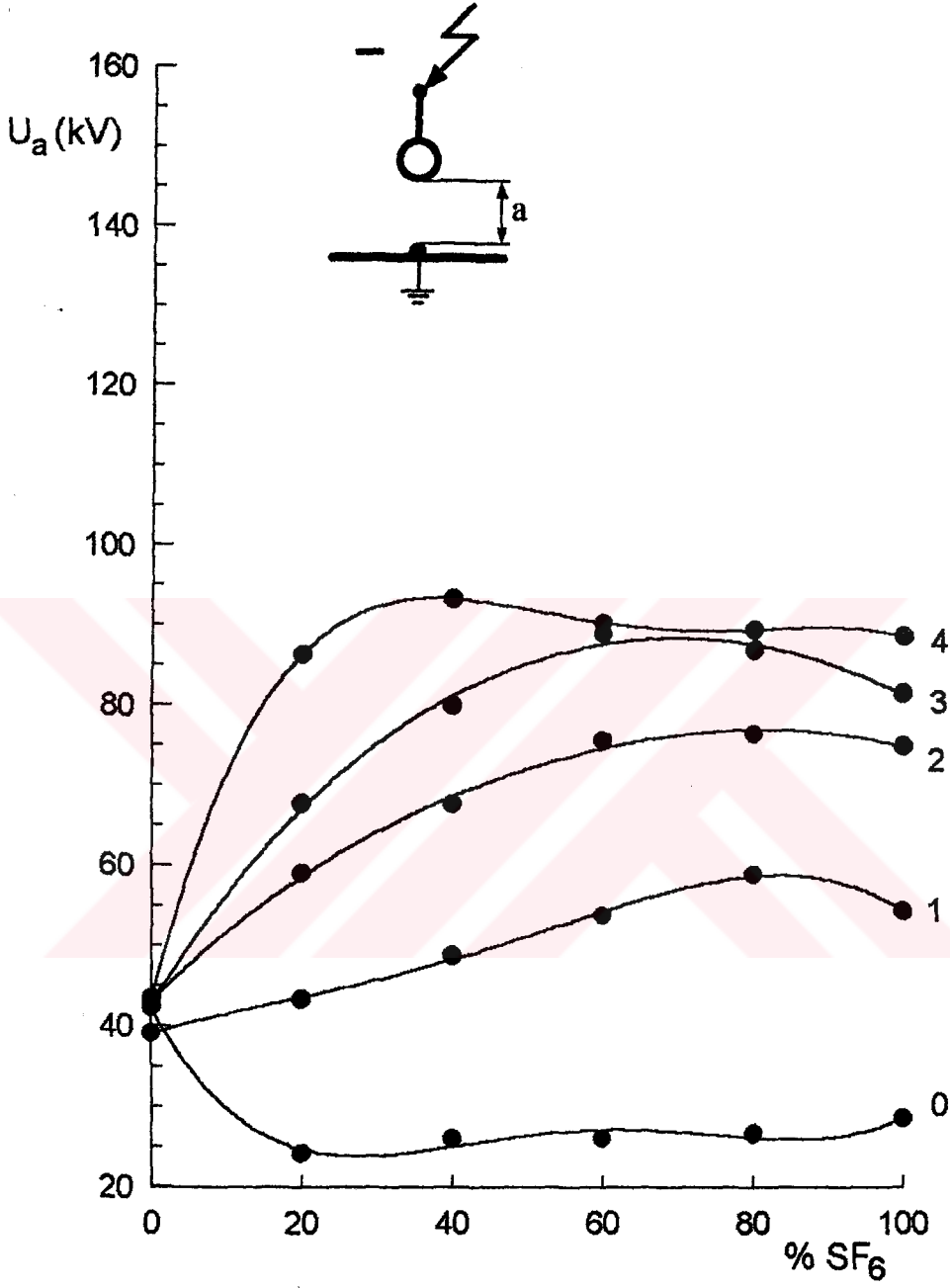
Şekil 5.77. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımındaki SF_6 oranı ile değişimi.



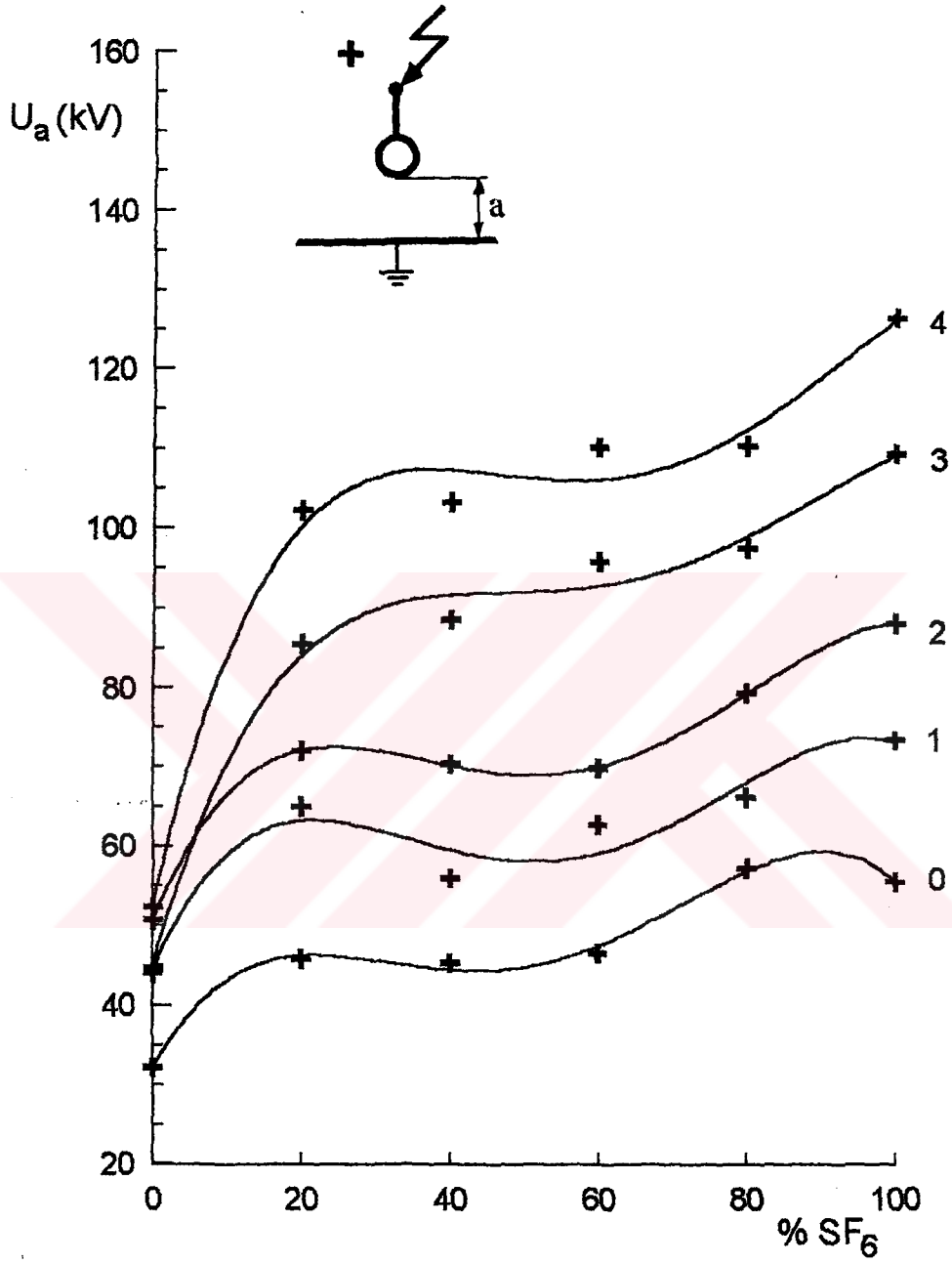
Şekil 5.78. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



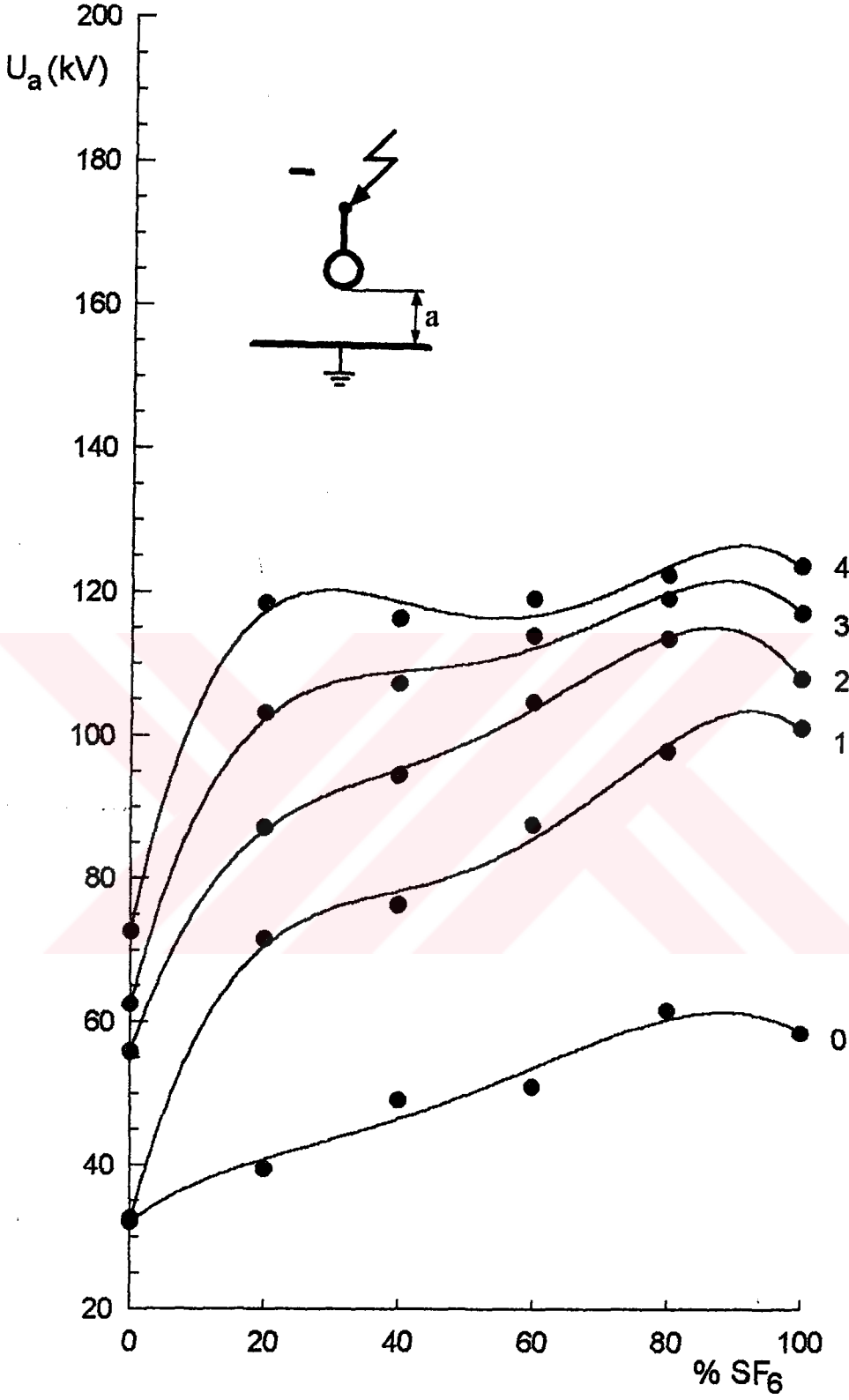
Şekil 5.79. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



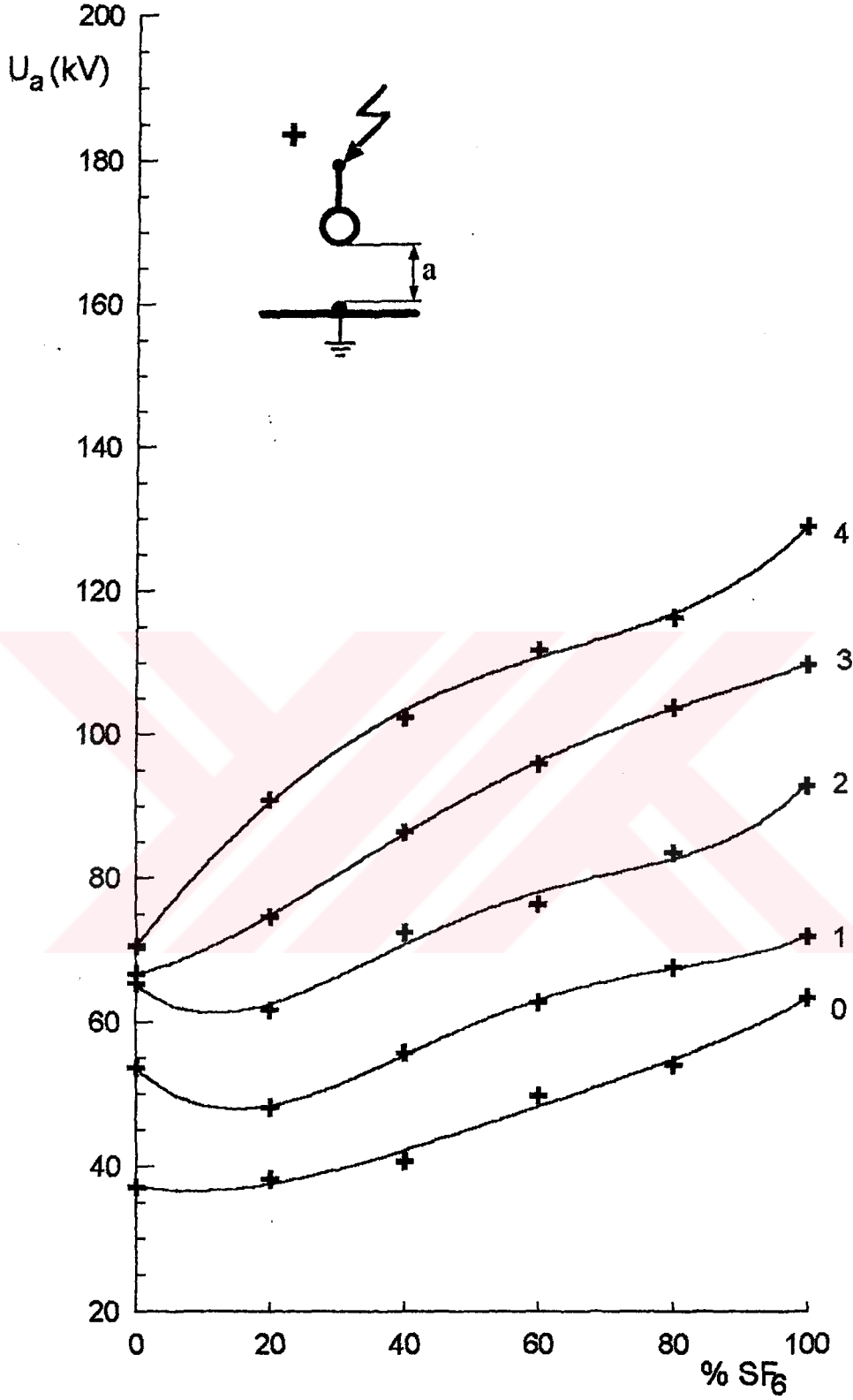
Şekil 5.80. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



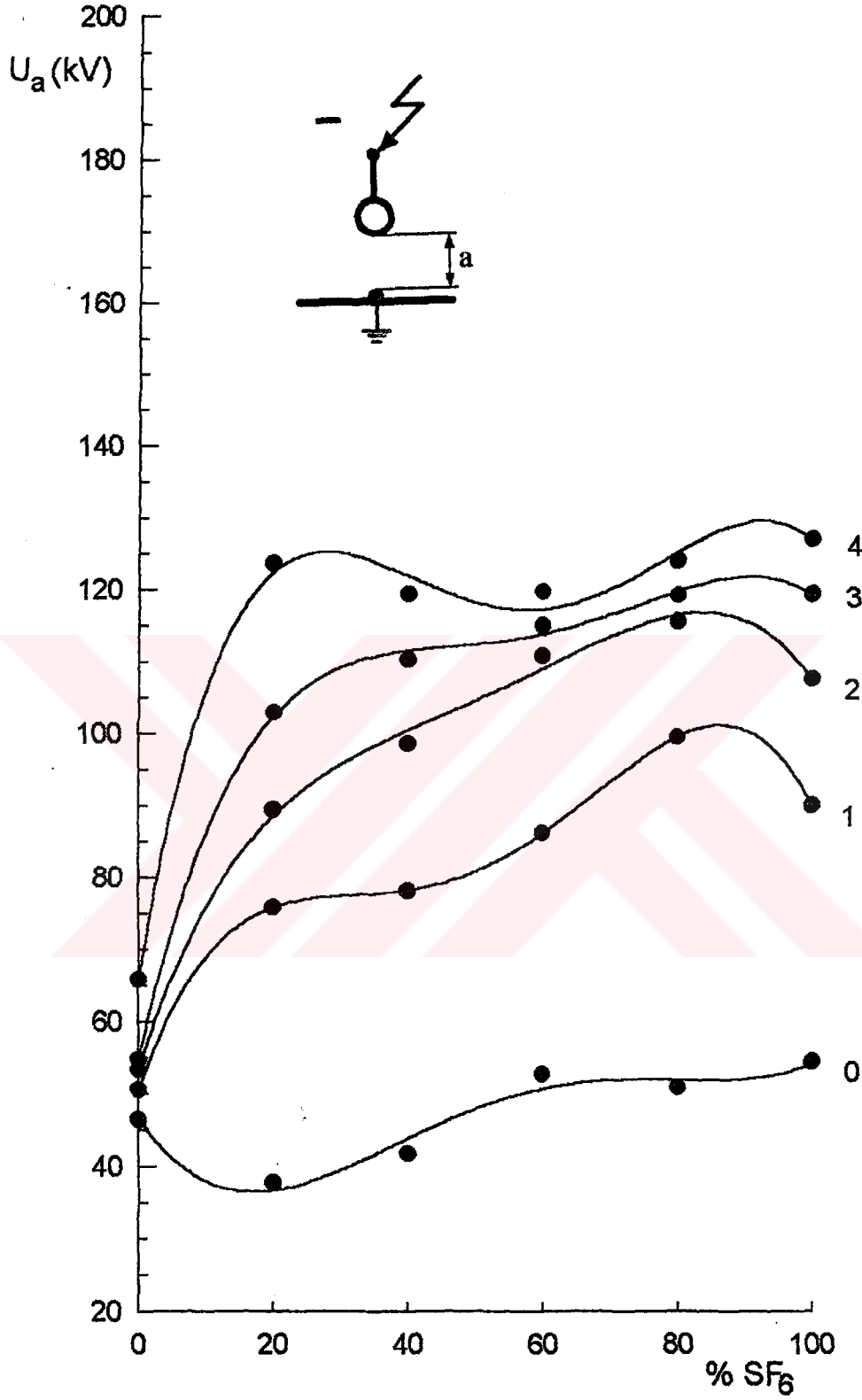
Şekil 5.81. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



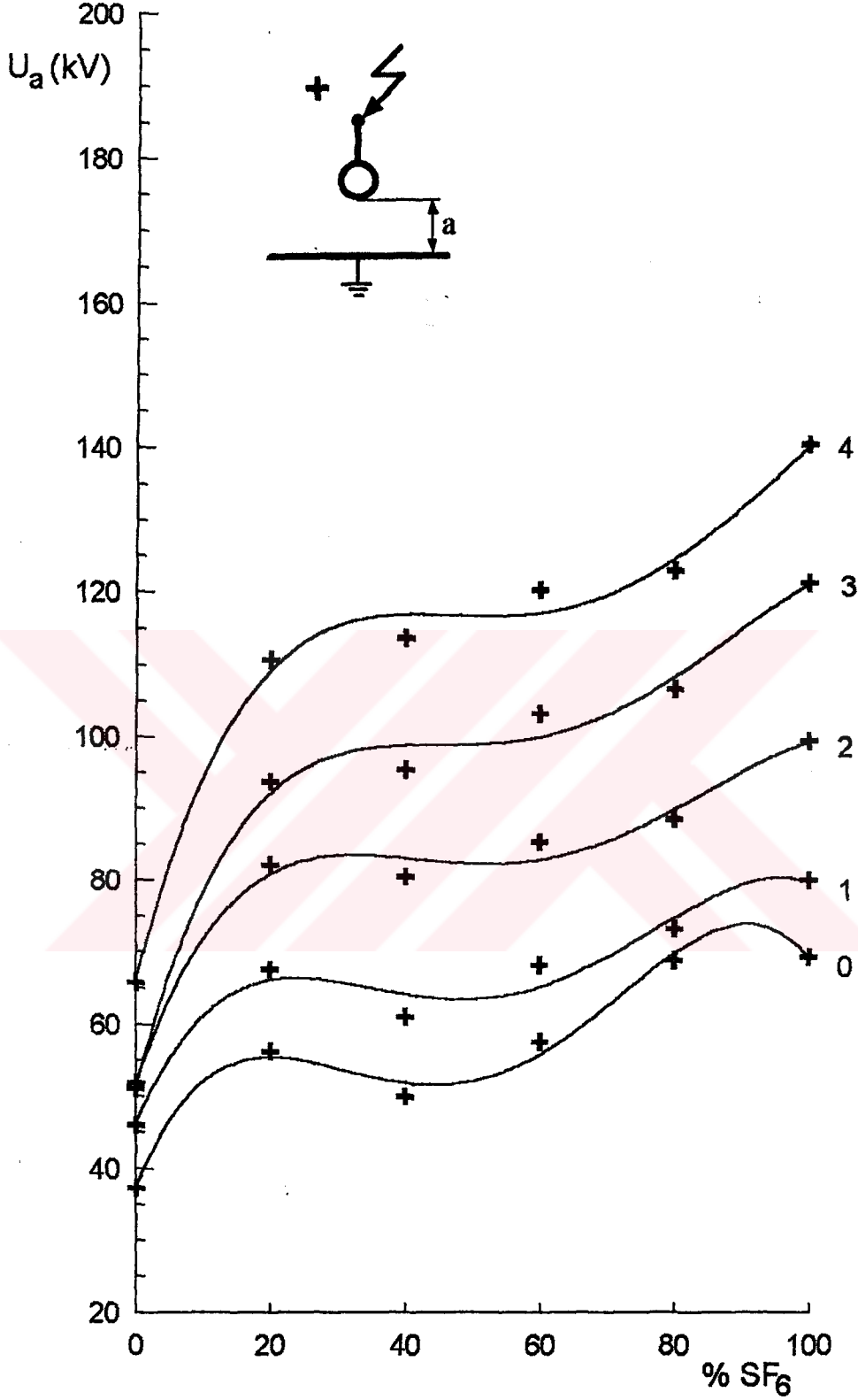
Şekil 5.82. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



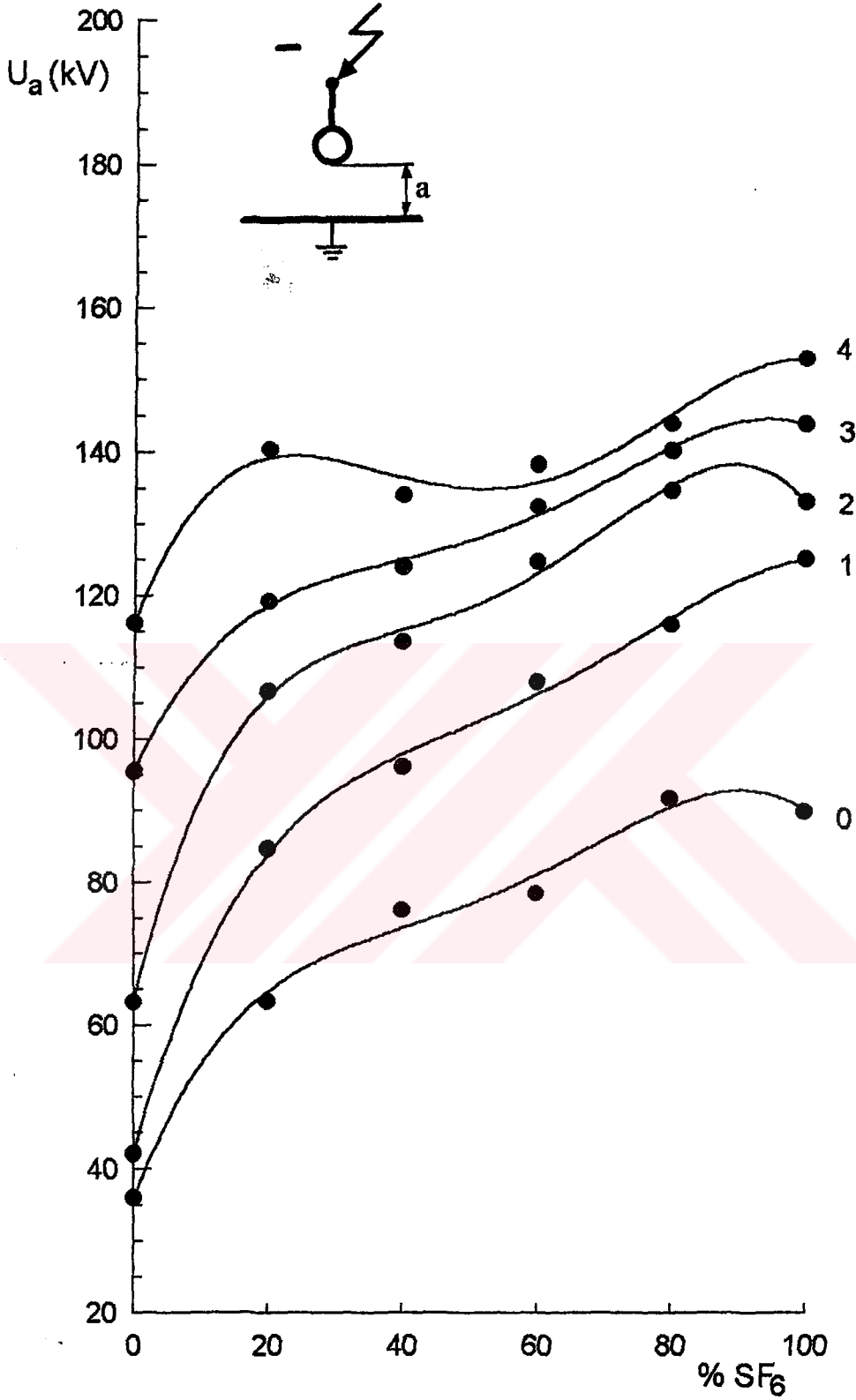
Şekil 5.83. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



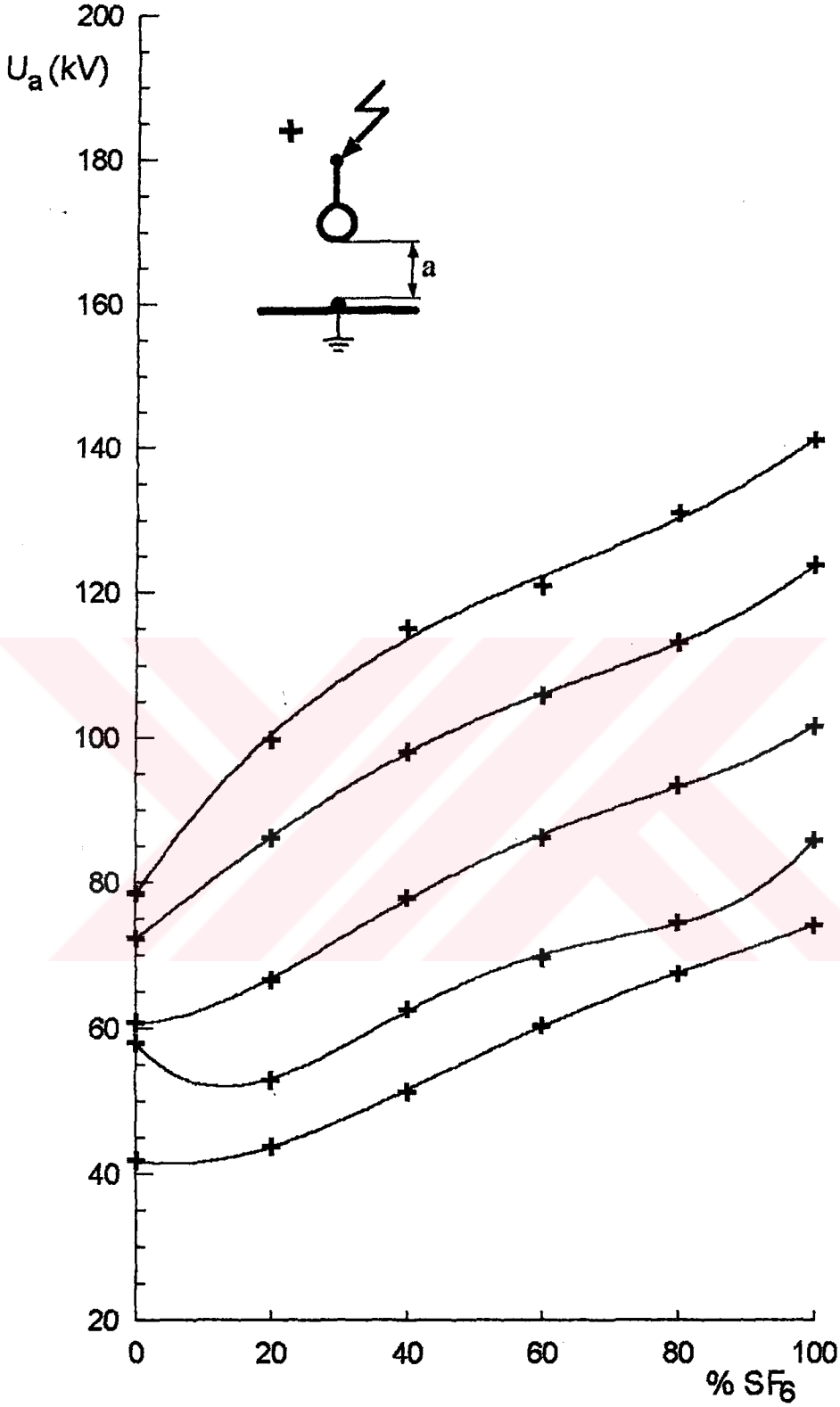
Şekil 5.84. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



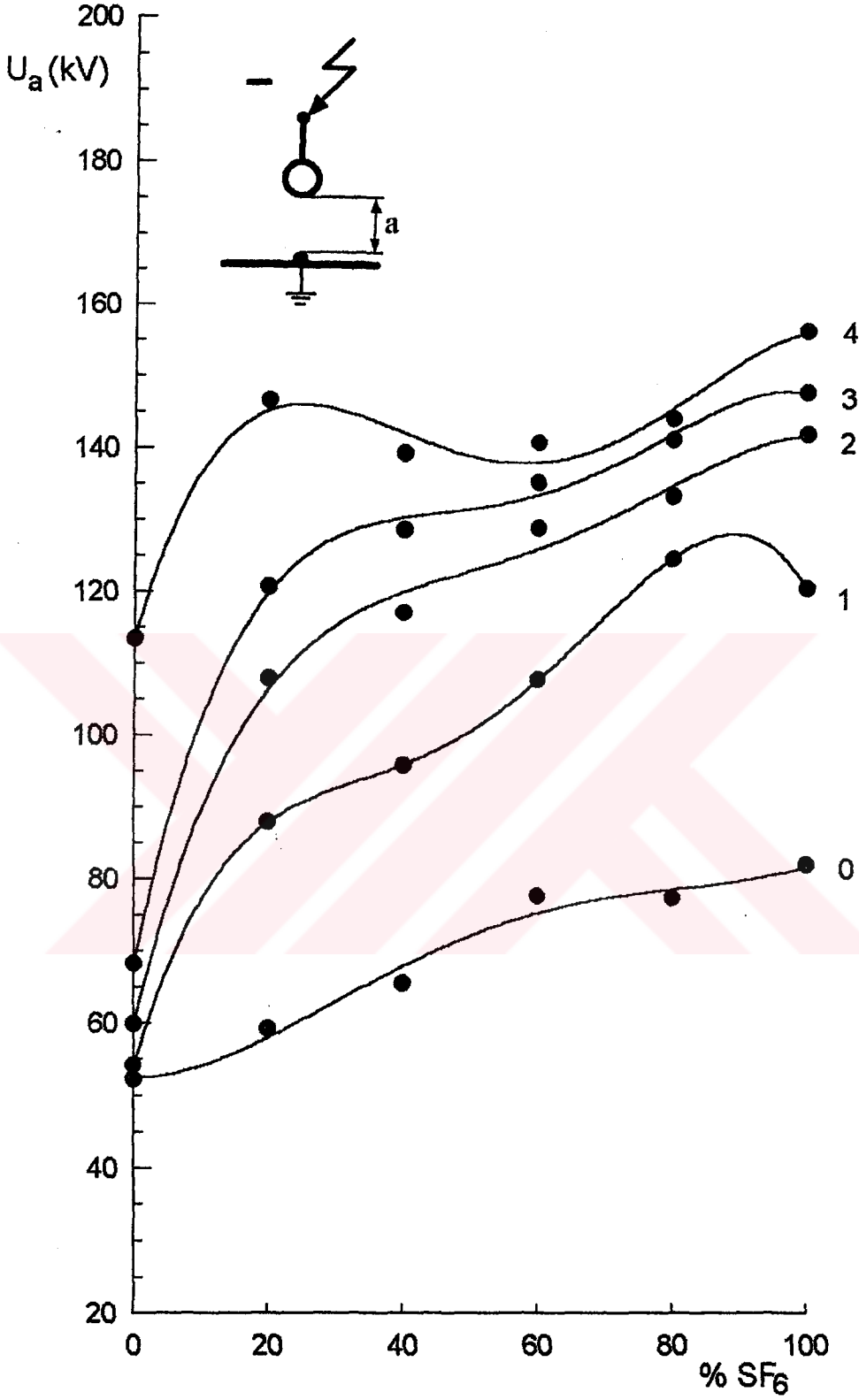
Şekil 5.85. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



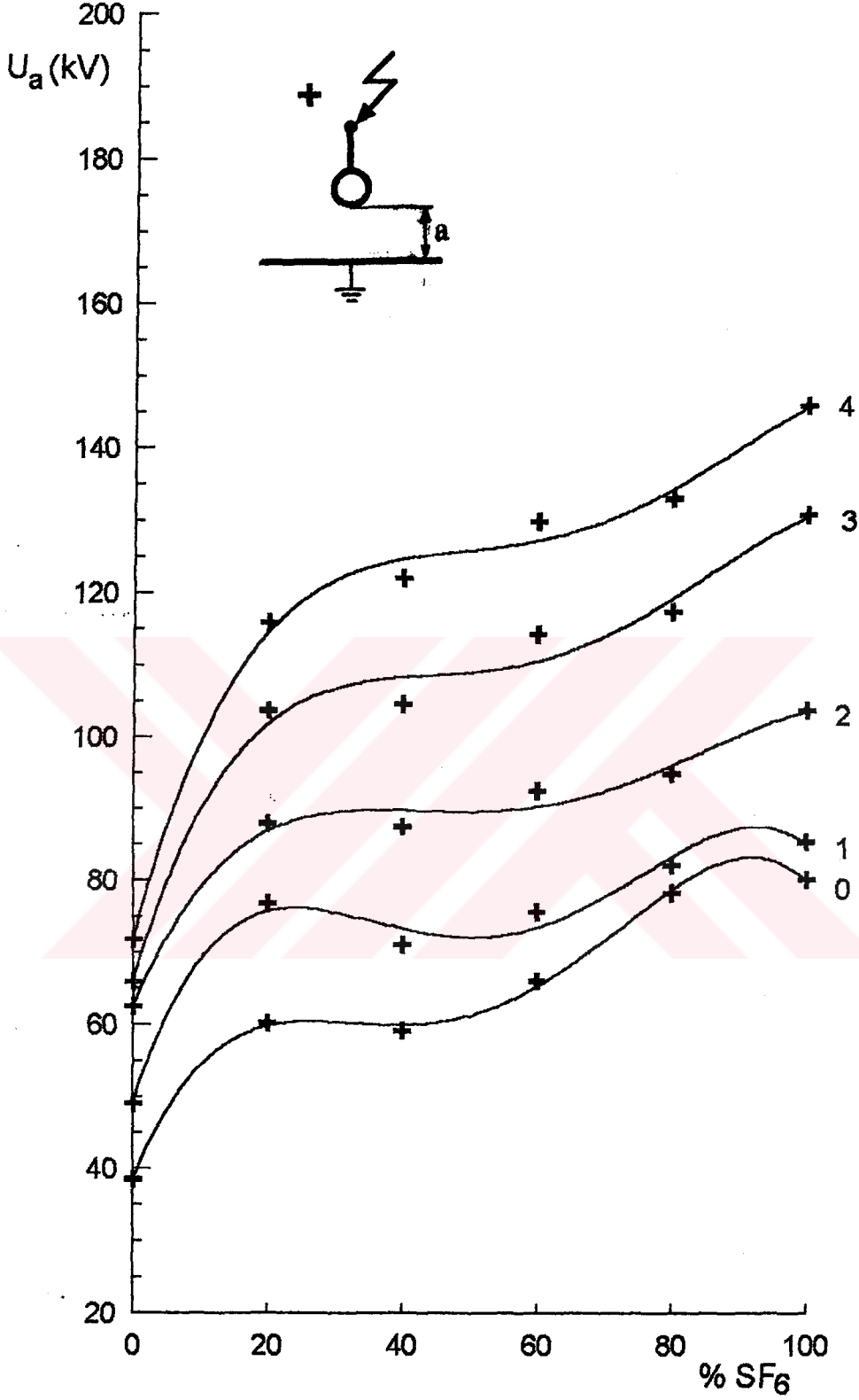
Şekil 5.86. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



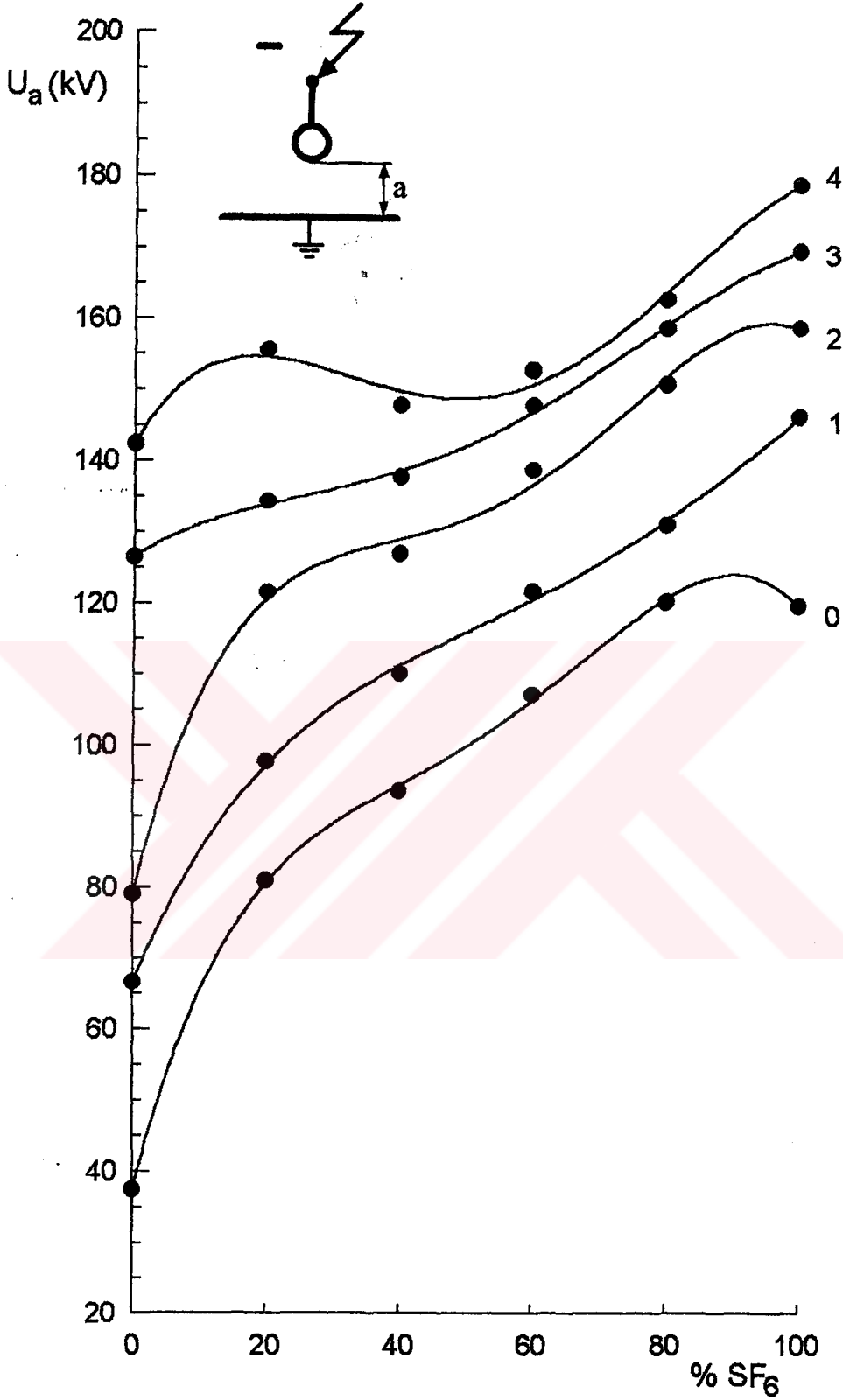
Şekil 5.87. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



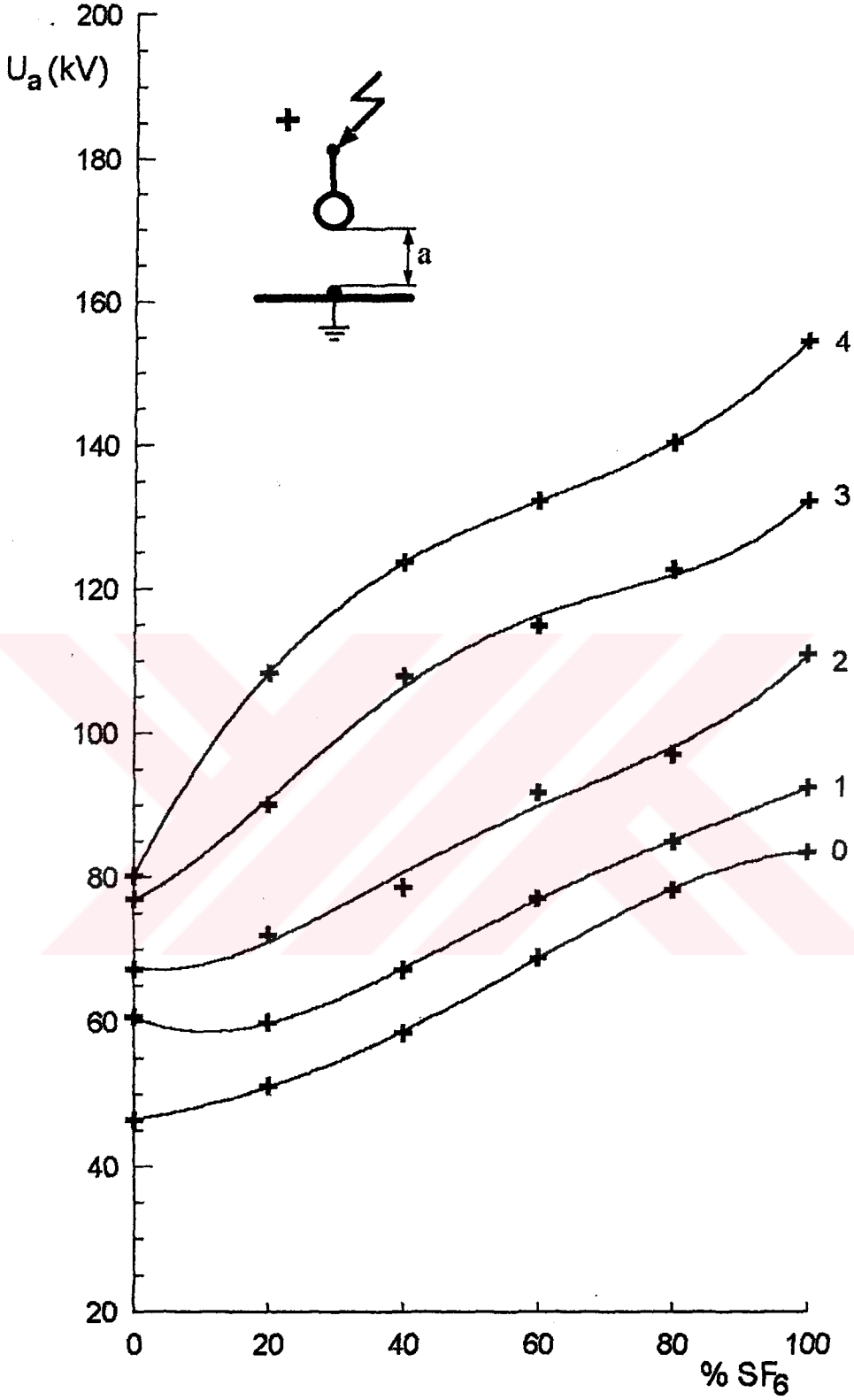
Şekil 5.88. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



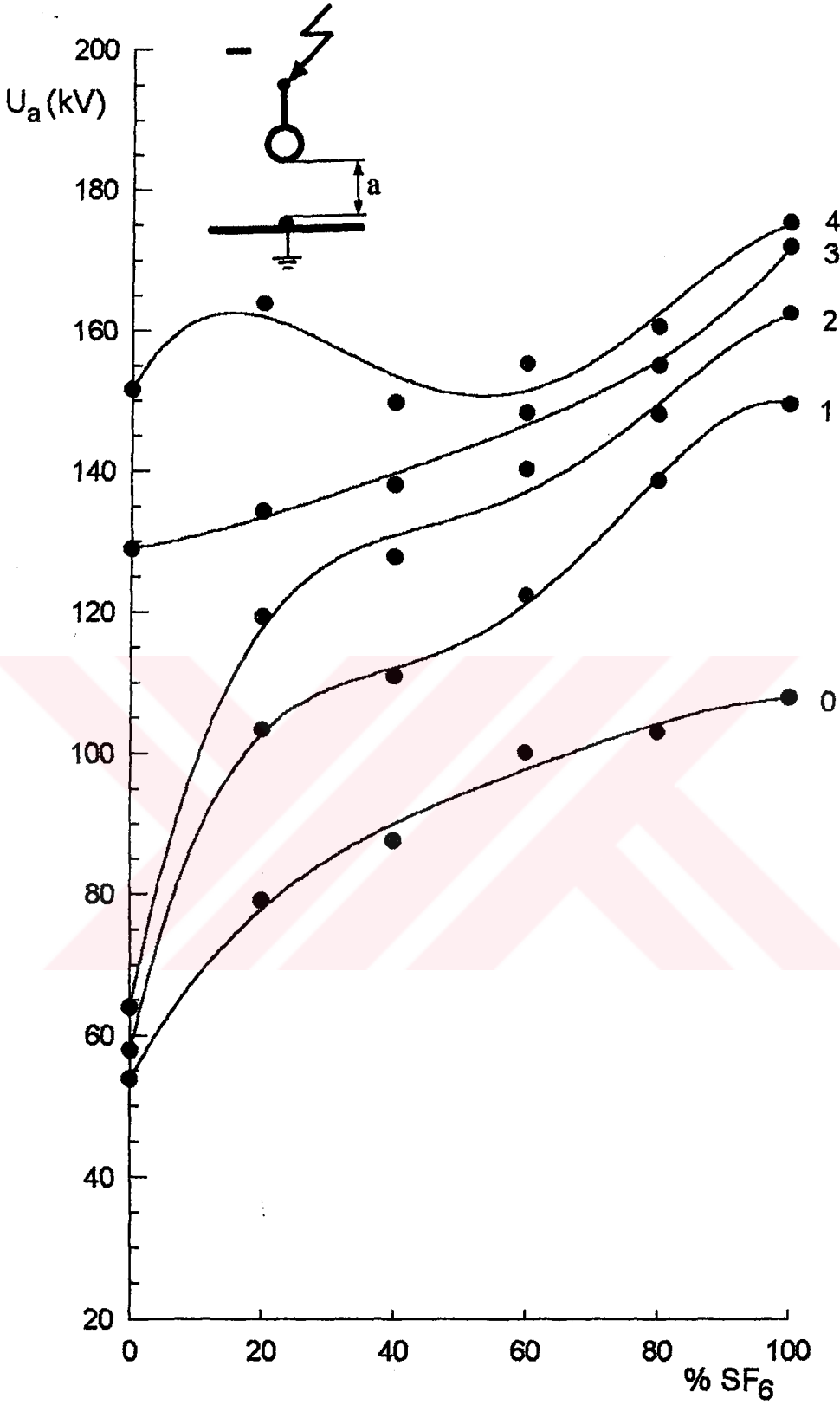
Şekil 5.89. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



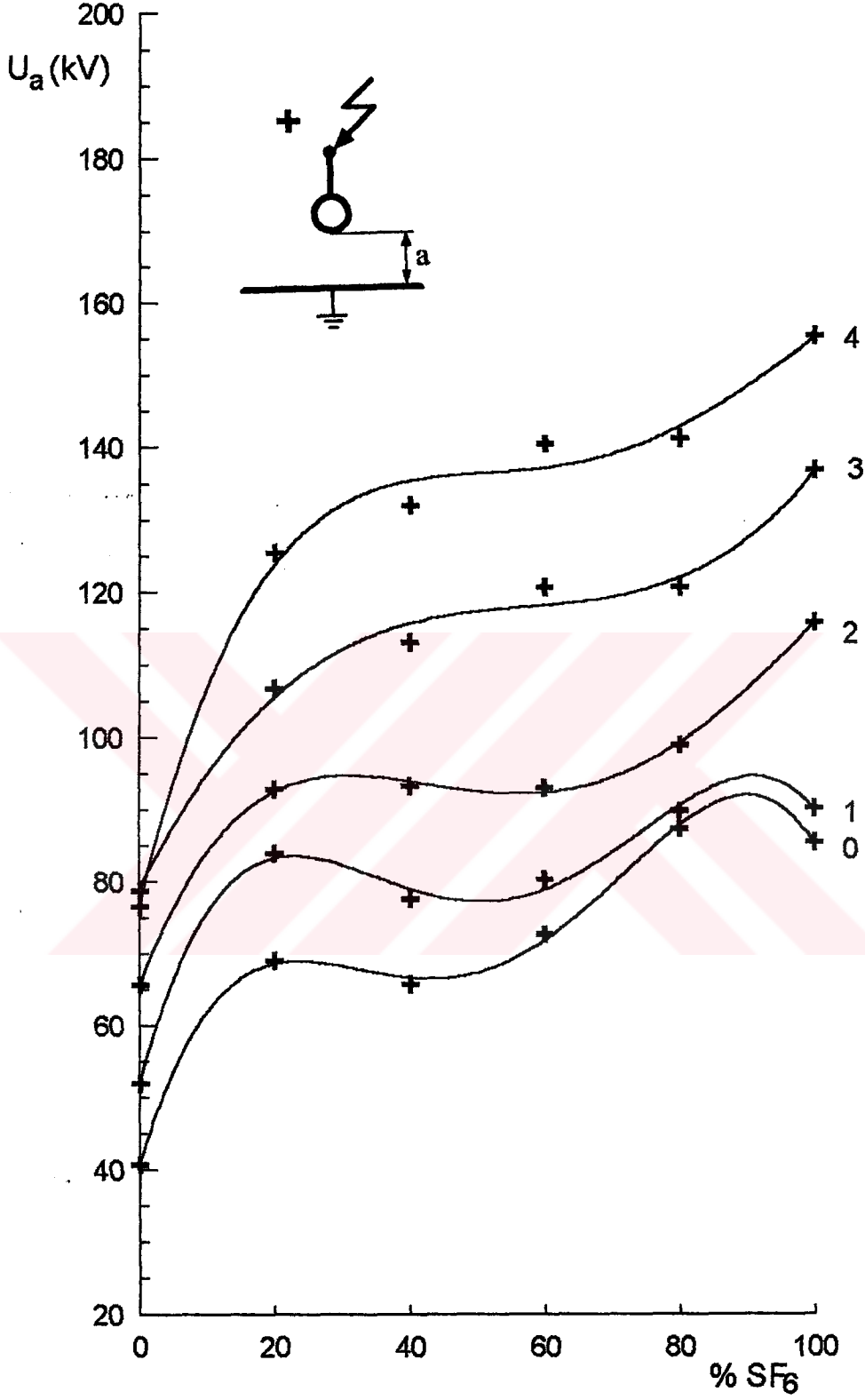
Şekil 5.90. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



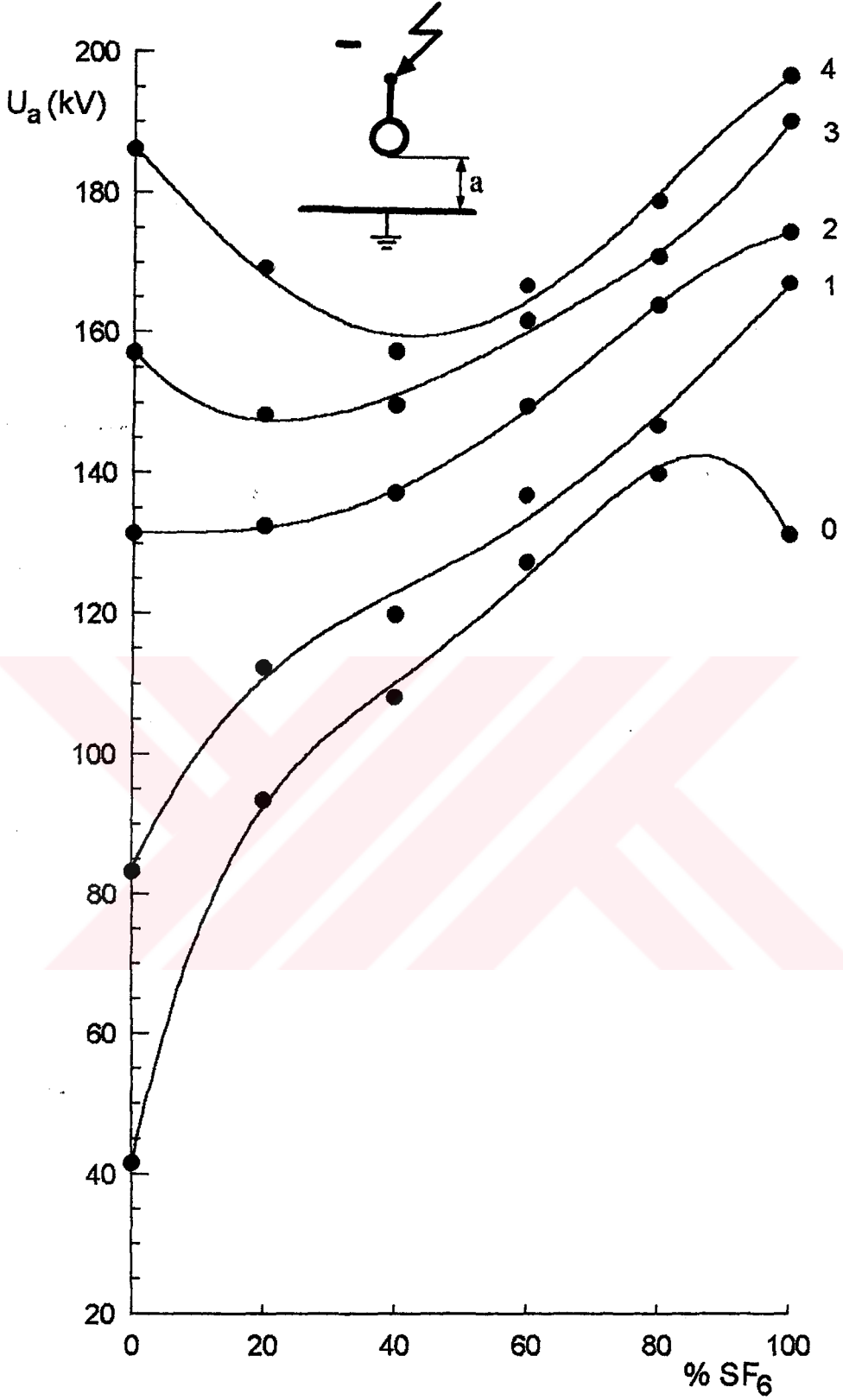
Şekil 5.91. SF₆+N₂ gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF₆ oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



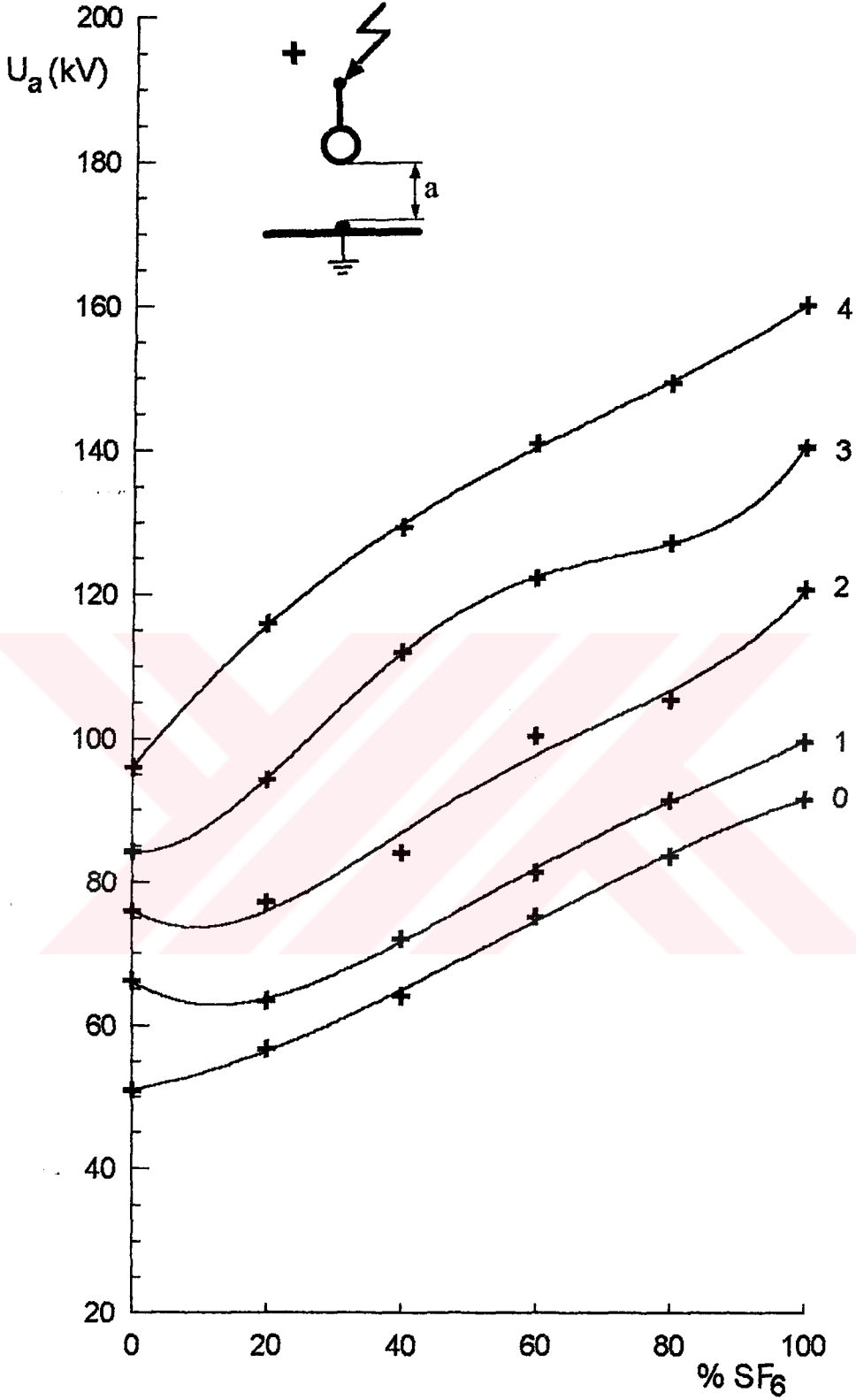
Şekil 5.92. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



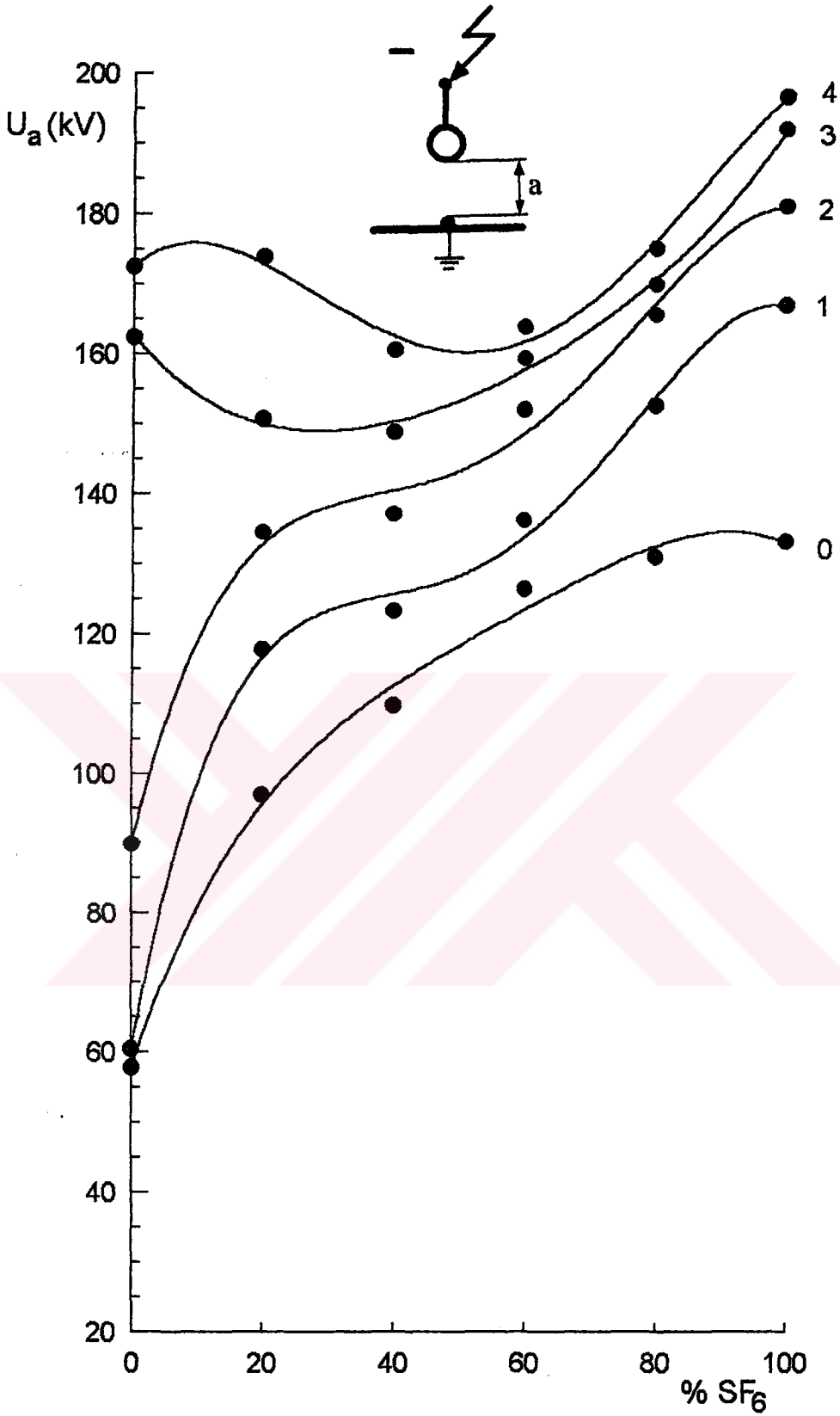
Şekil 5.93. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



Şekil 5.94. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi.



Şekil 5.95. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında pozitif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).



Şekil 5.96. SF_6+N_2 gaz karışımında, 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme geriliminin karışımdaki SF_6 oranı ile değişimi (pürüz yarıçapı 1 mm).

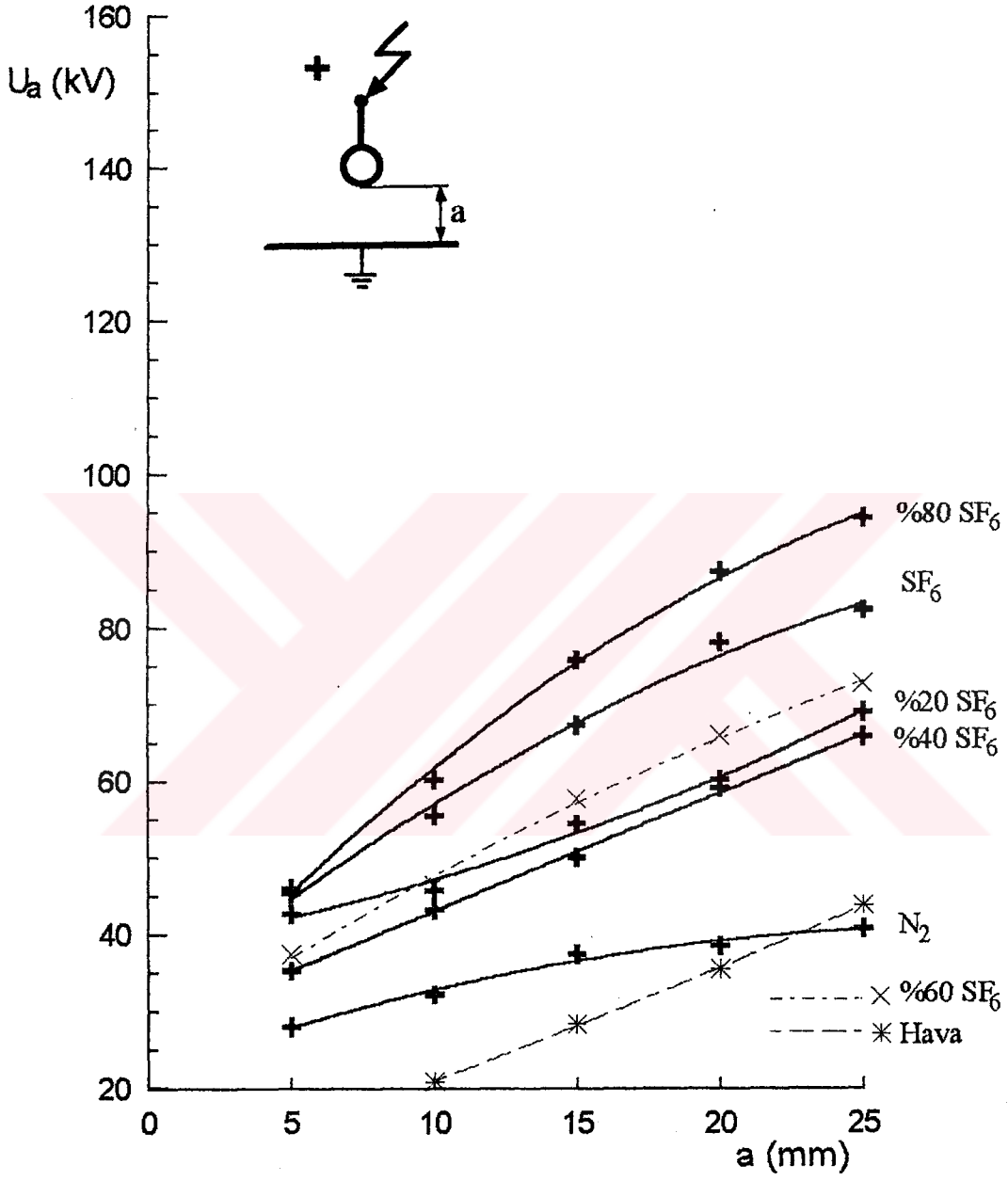
BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

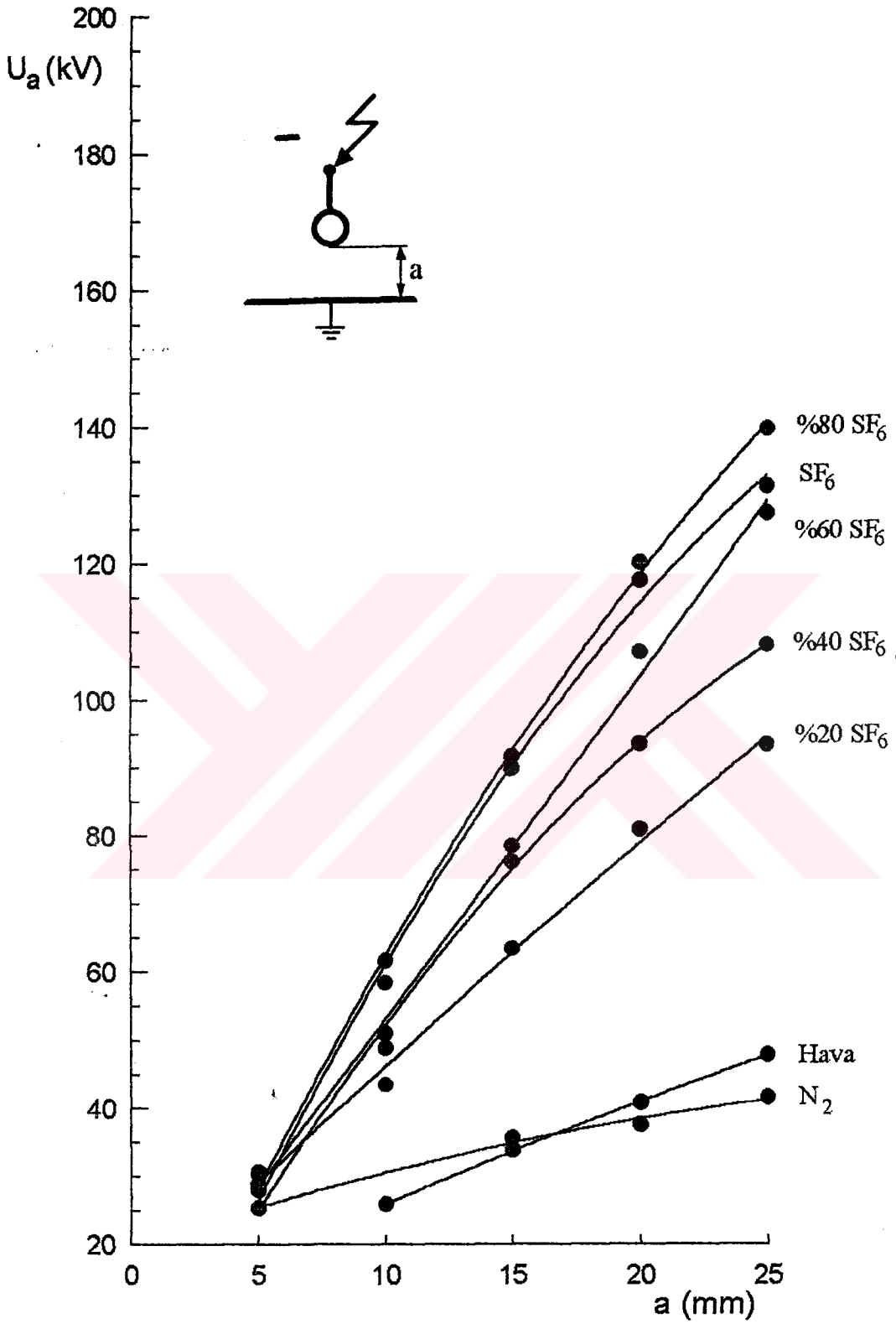
Bu bölümde, hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için Bölüm 5'te verilen deney sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılmasında sırasıyla küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, önce sabit basınçta sonra sabit elektrot açıklığında darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile ve basınçla değişimleri ele alınmıştır. Karşılaştırmalar, deney sonuçlarının yorumlanmasını ve sonuç çıkarılmasını kolaylaştırmış, boşalma olaylarının parametrelerine bağlılığını görme olanağını vermiştir.

6.1. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için sabit basınçlarda darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması

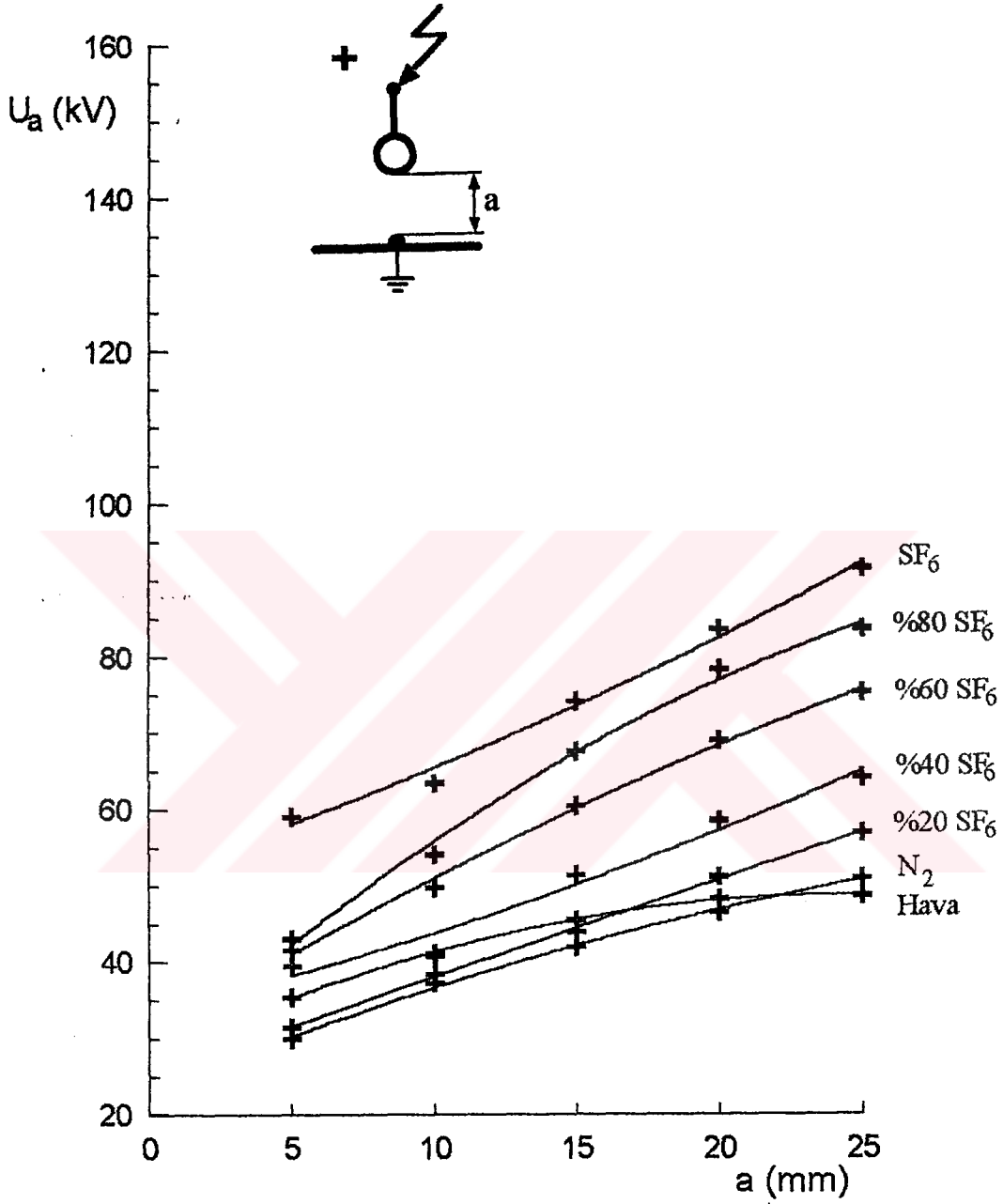
Burada, hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için sabit ($b=0-1-2-3-4$ bar) basınçlarda darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimleri karşılaştırılabilir şekilde bir arada çizilmiştir. Şekil 6.1-6.4'te $b=0$ bar'da, Şekil 6.5-6.8'de $b=1$ bar'da, Şekil 6.9-6.12'de $b=2$ bar'da, Şekil 6.13-6.16'da $b=3$ bar'da ve Şekil 6.17-6.20'de $b=4$ bar'da yapılan karşılaştırmalar görülmektedir.



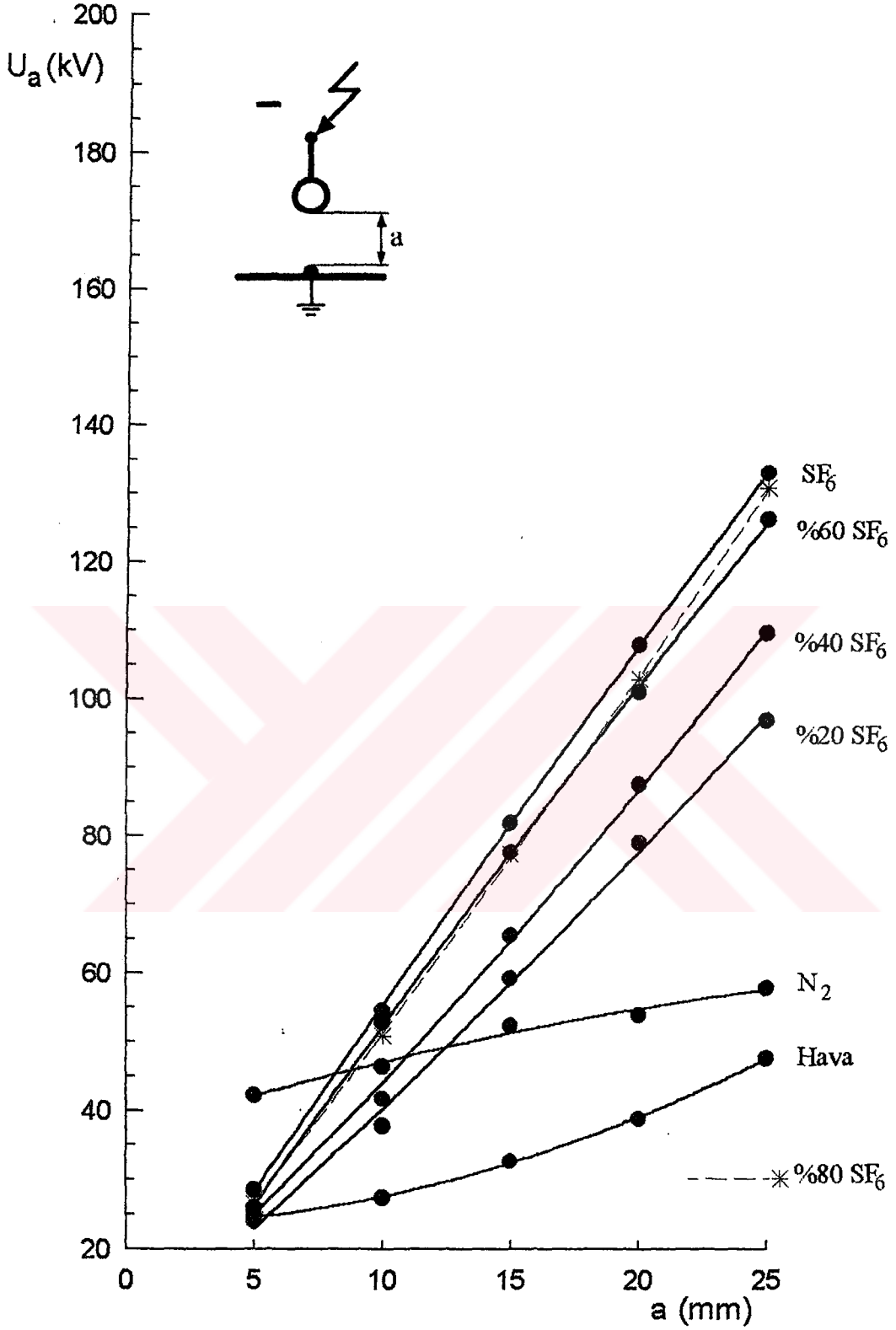
Şekil 6.1. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



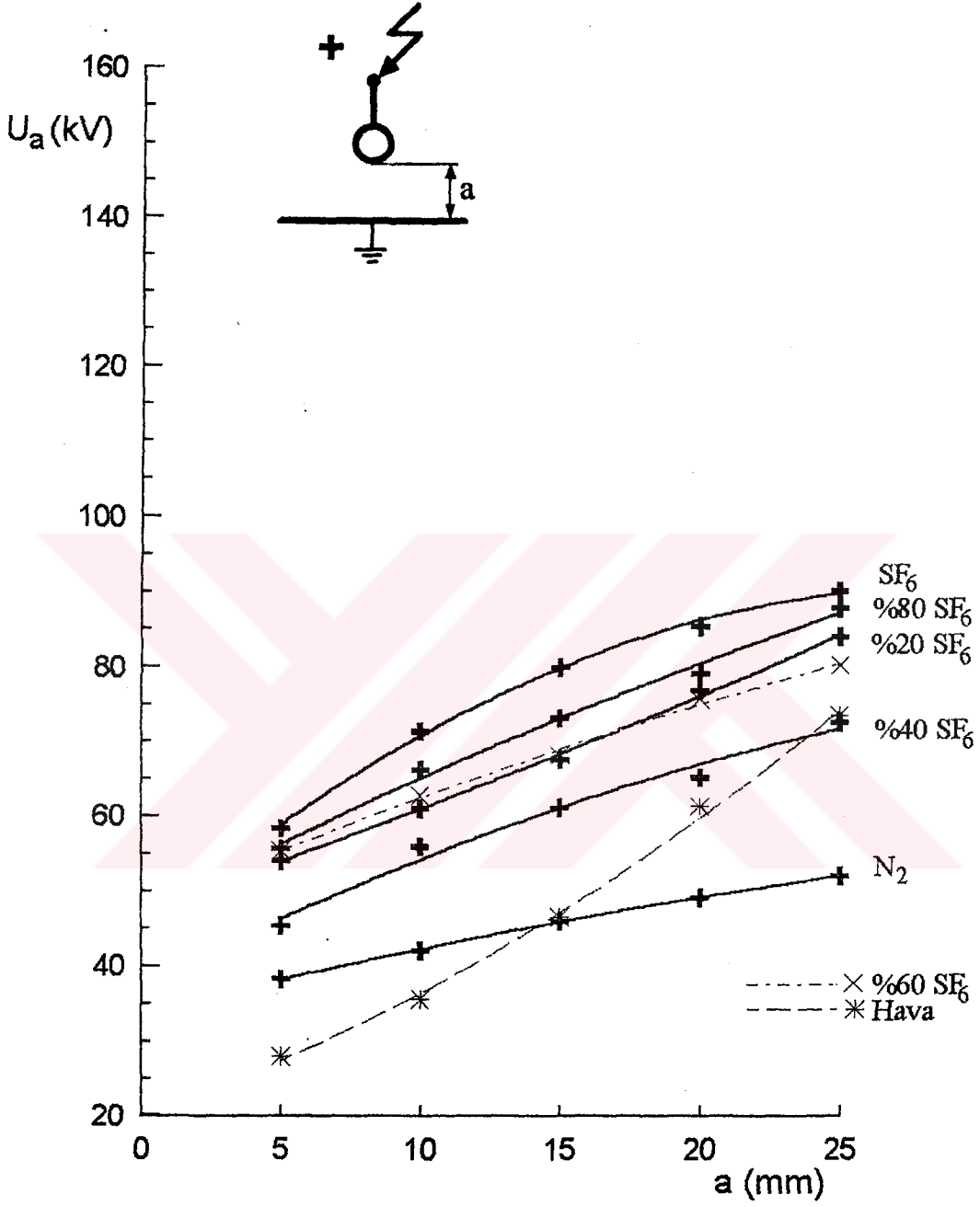
Şekil 6.2. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 0 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



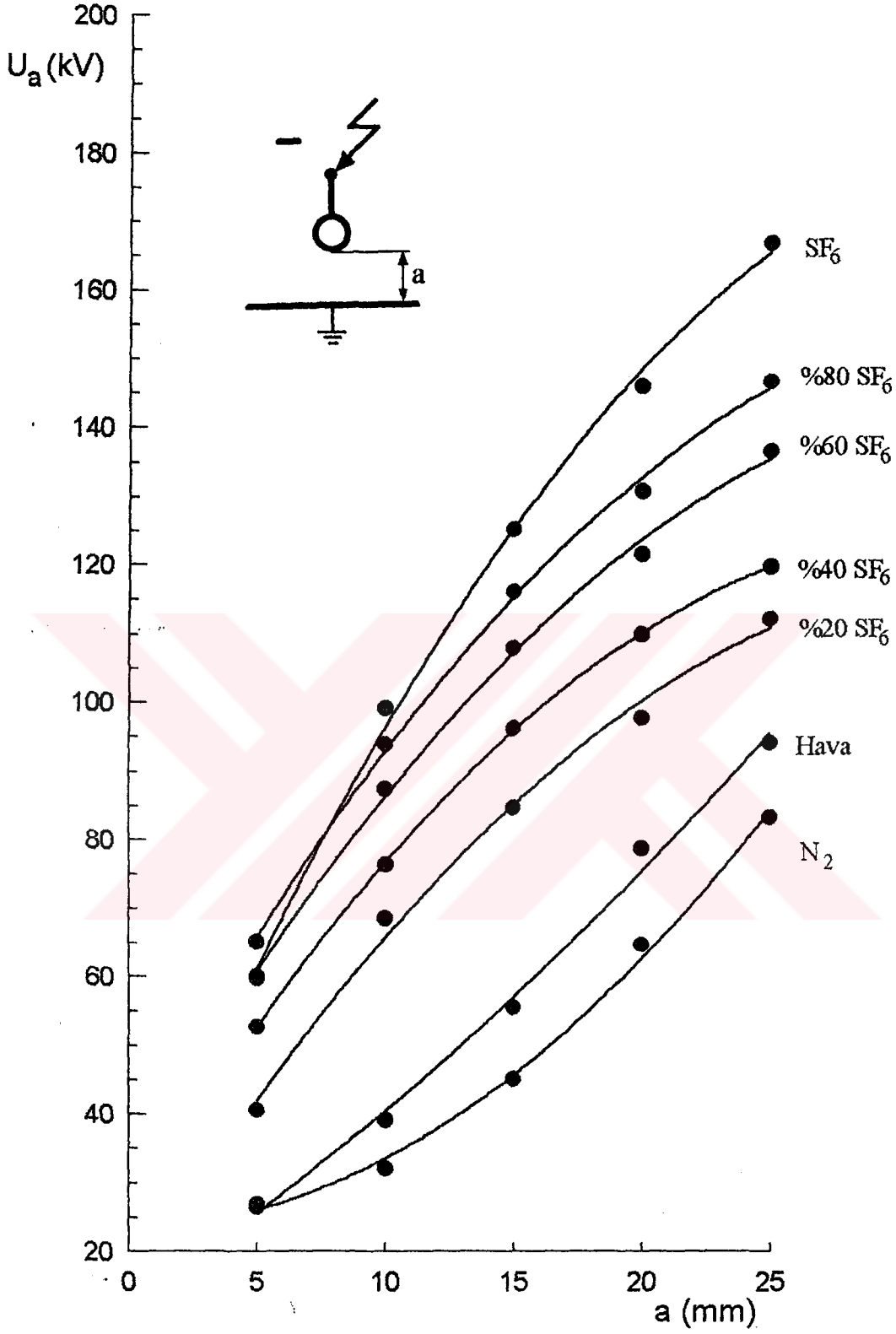
Şekil 6.3. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



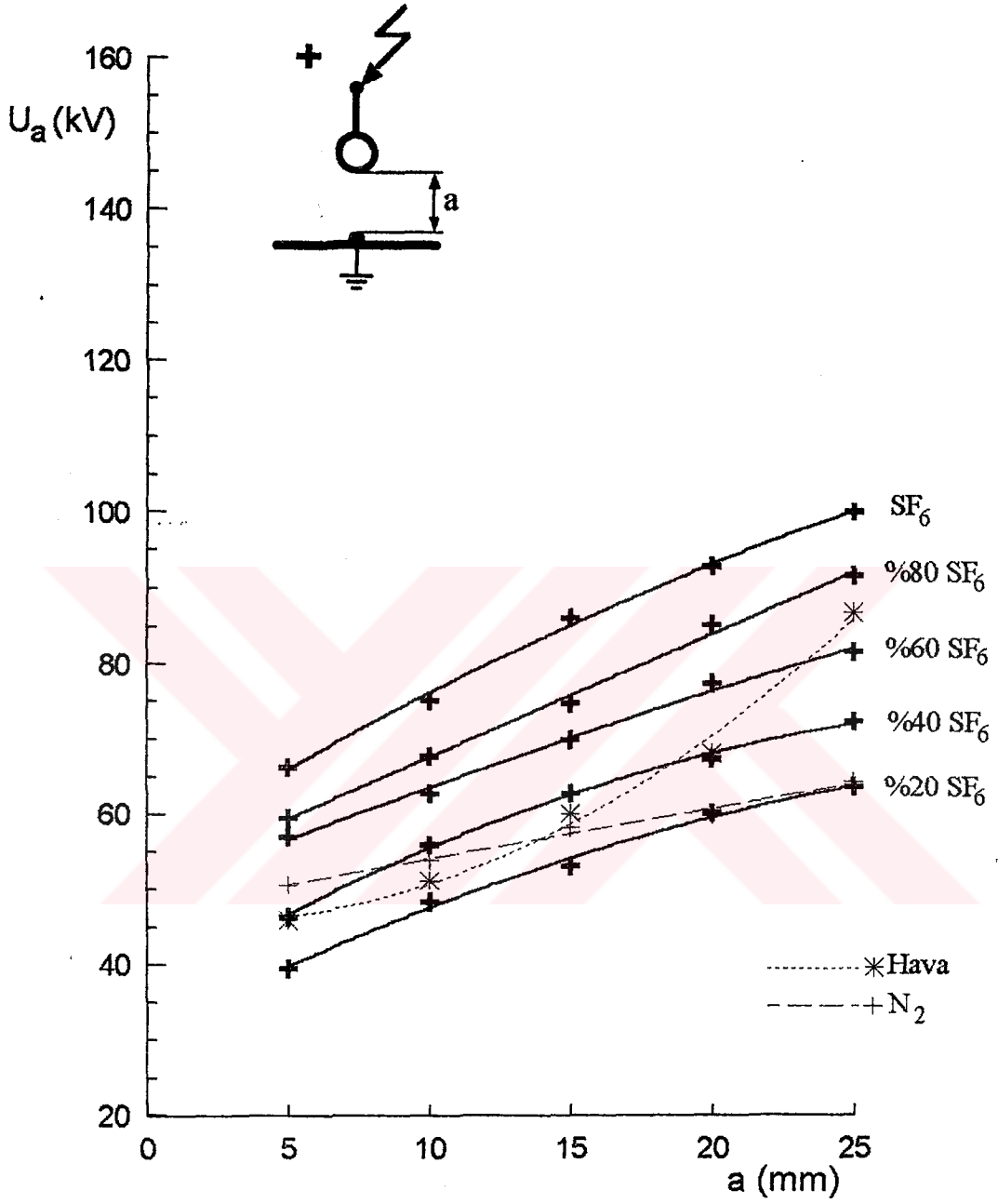
Şekil 6.4. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



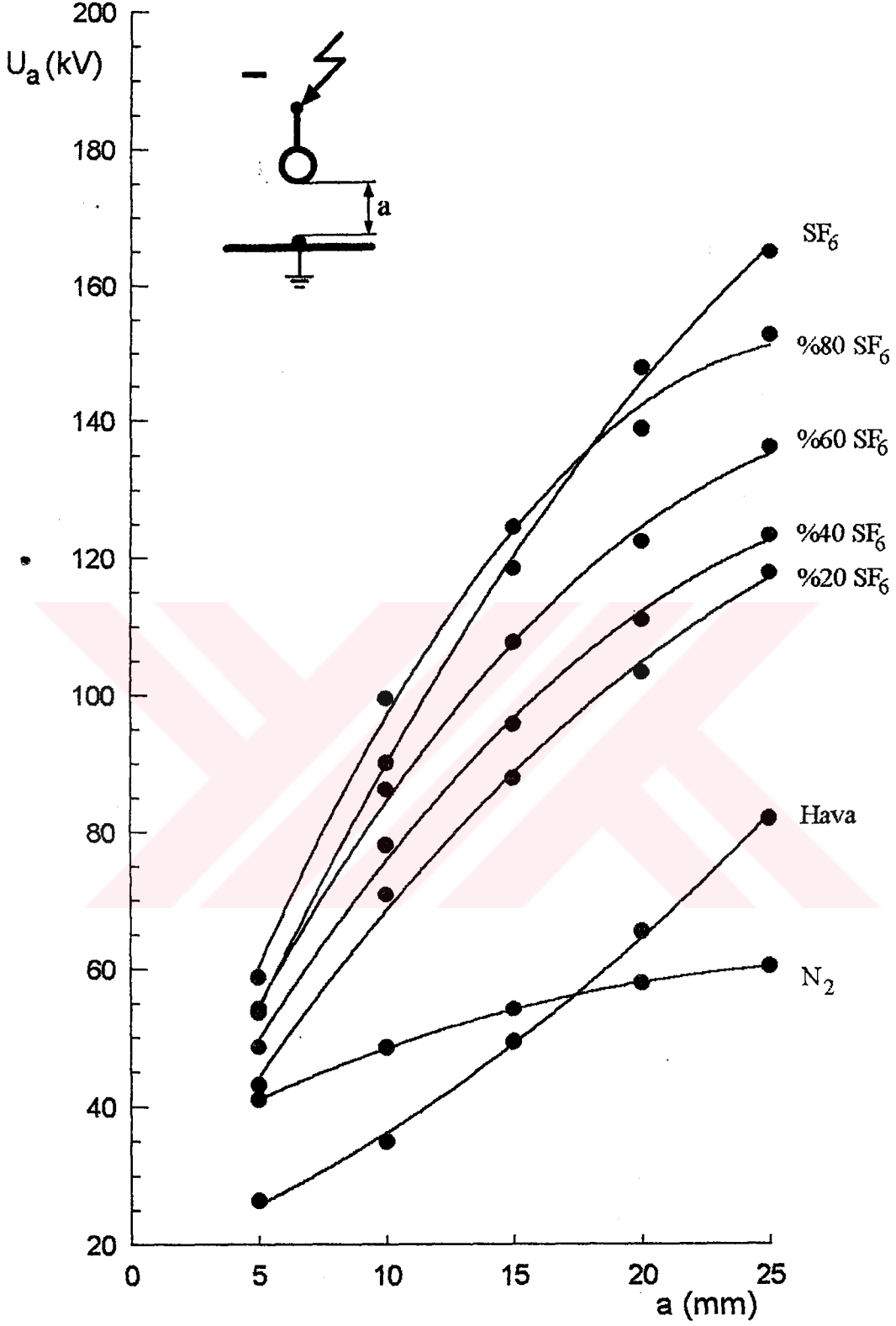
Şekil 6.5. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 1 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



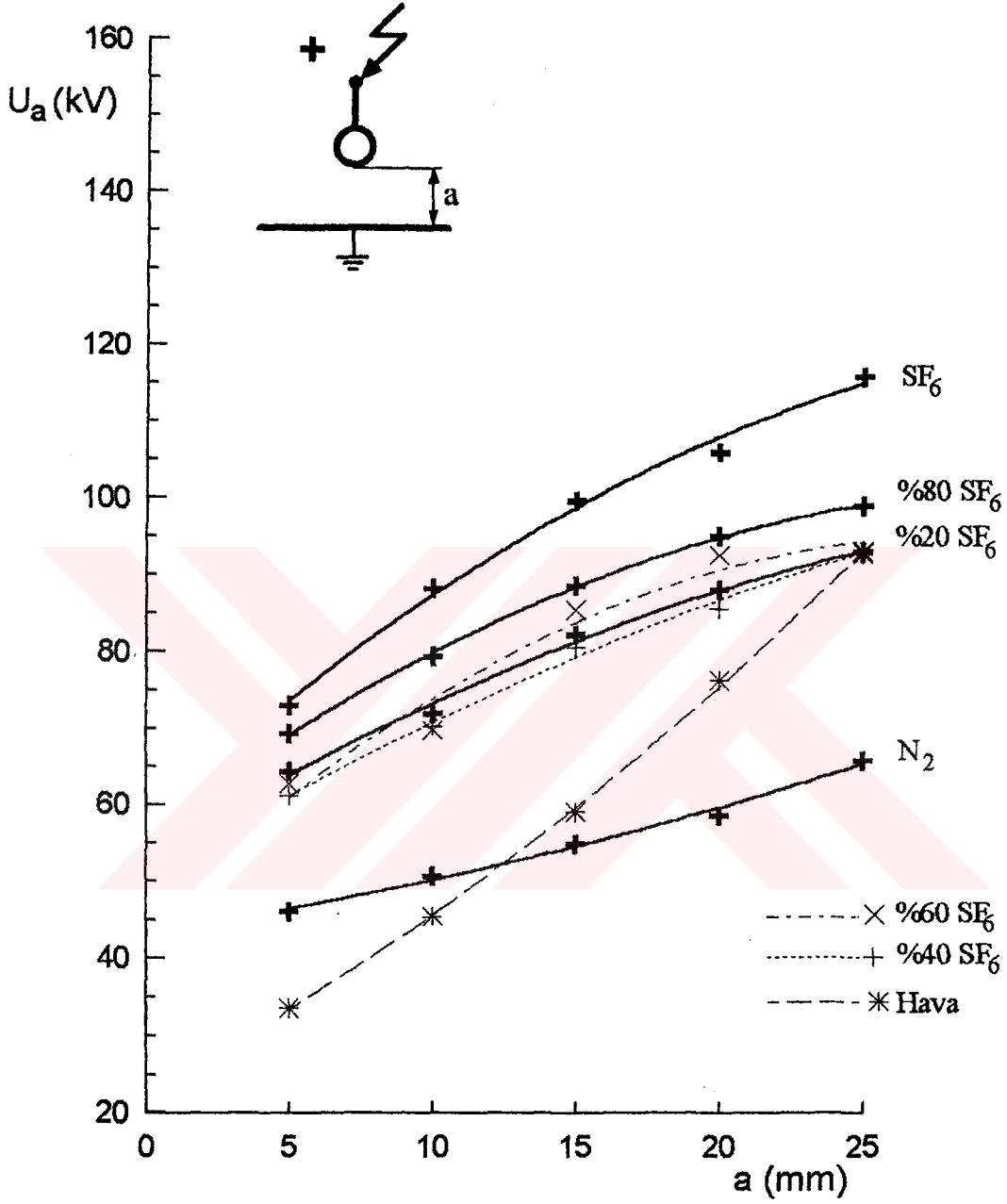
Şekil 6.6. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 1 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



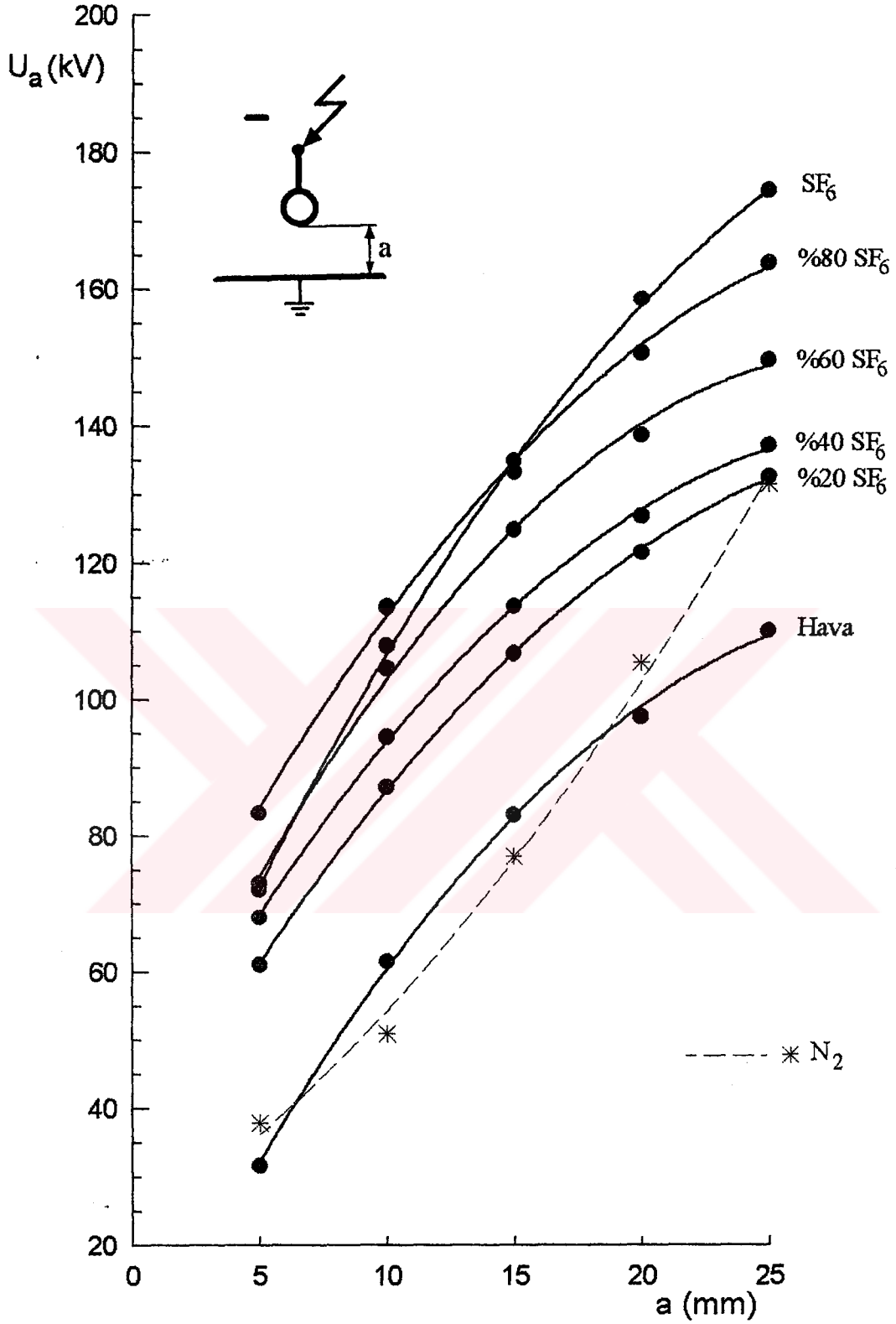
Şekil 6.7. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 1 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



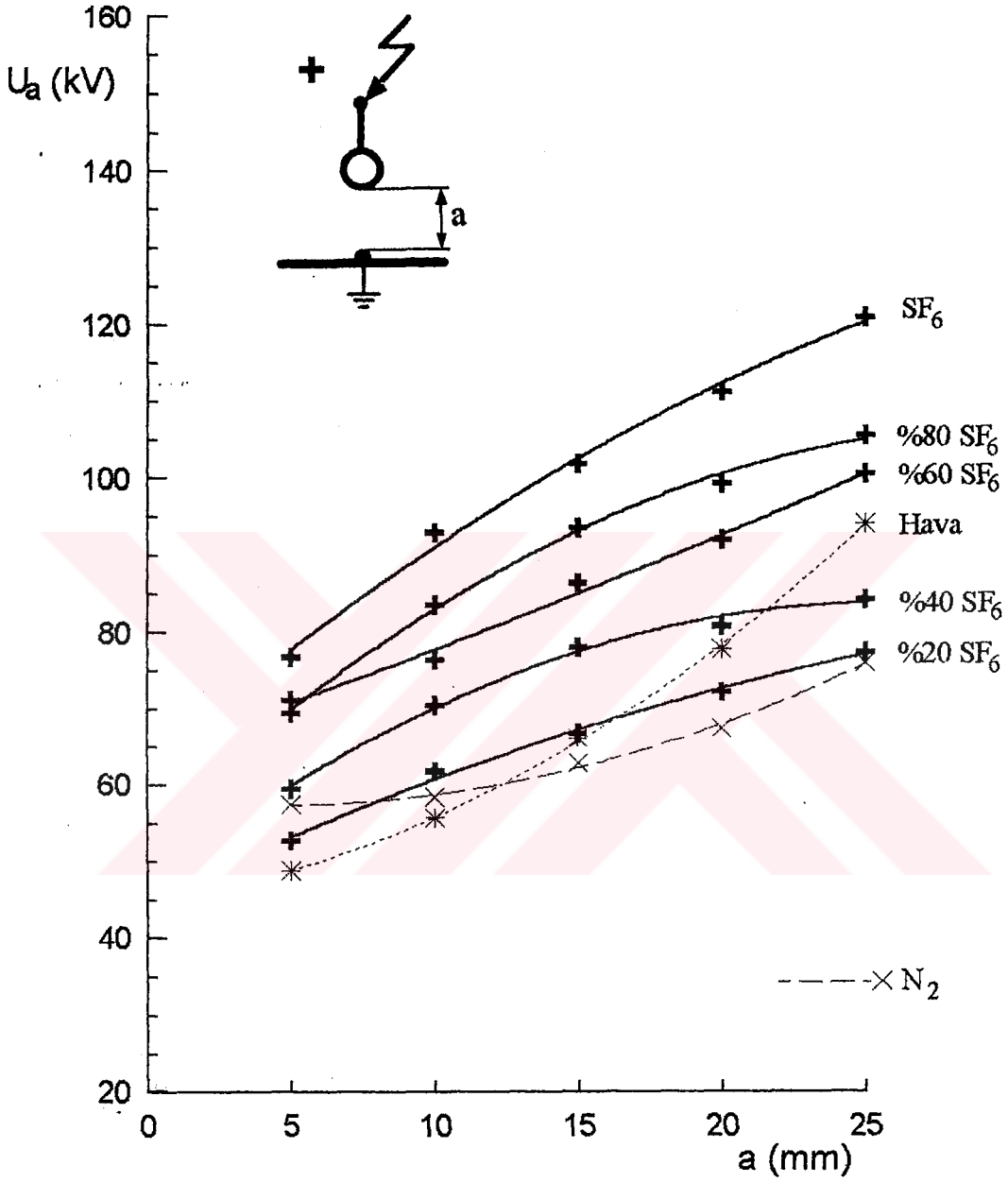
Şekil 6.8. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 1 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



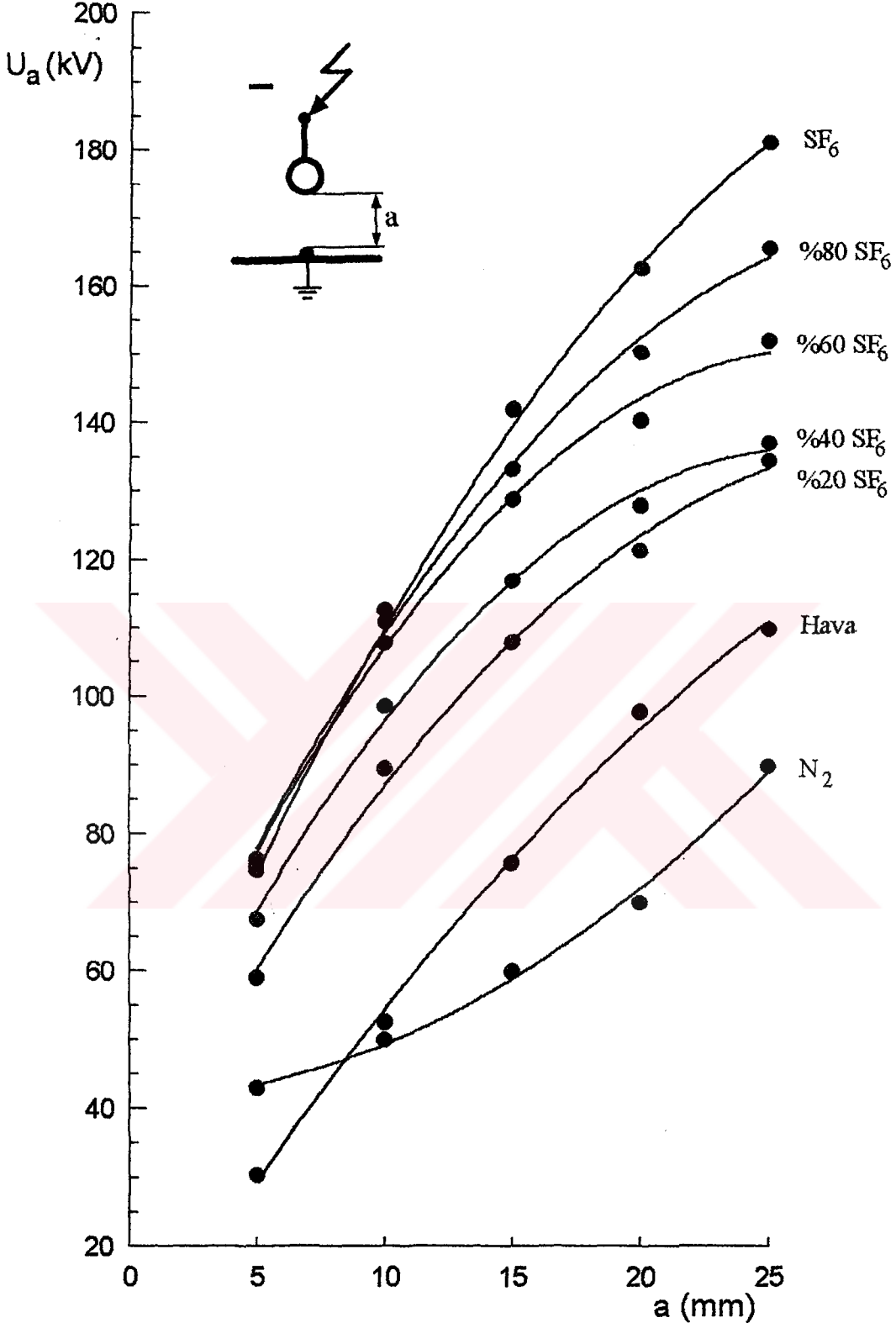
Şekil 6.9. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 2 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



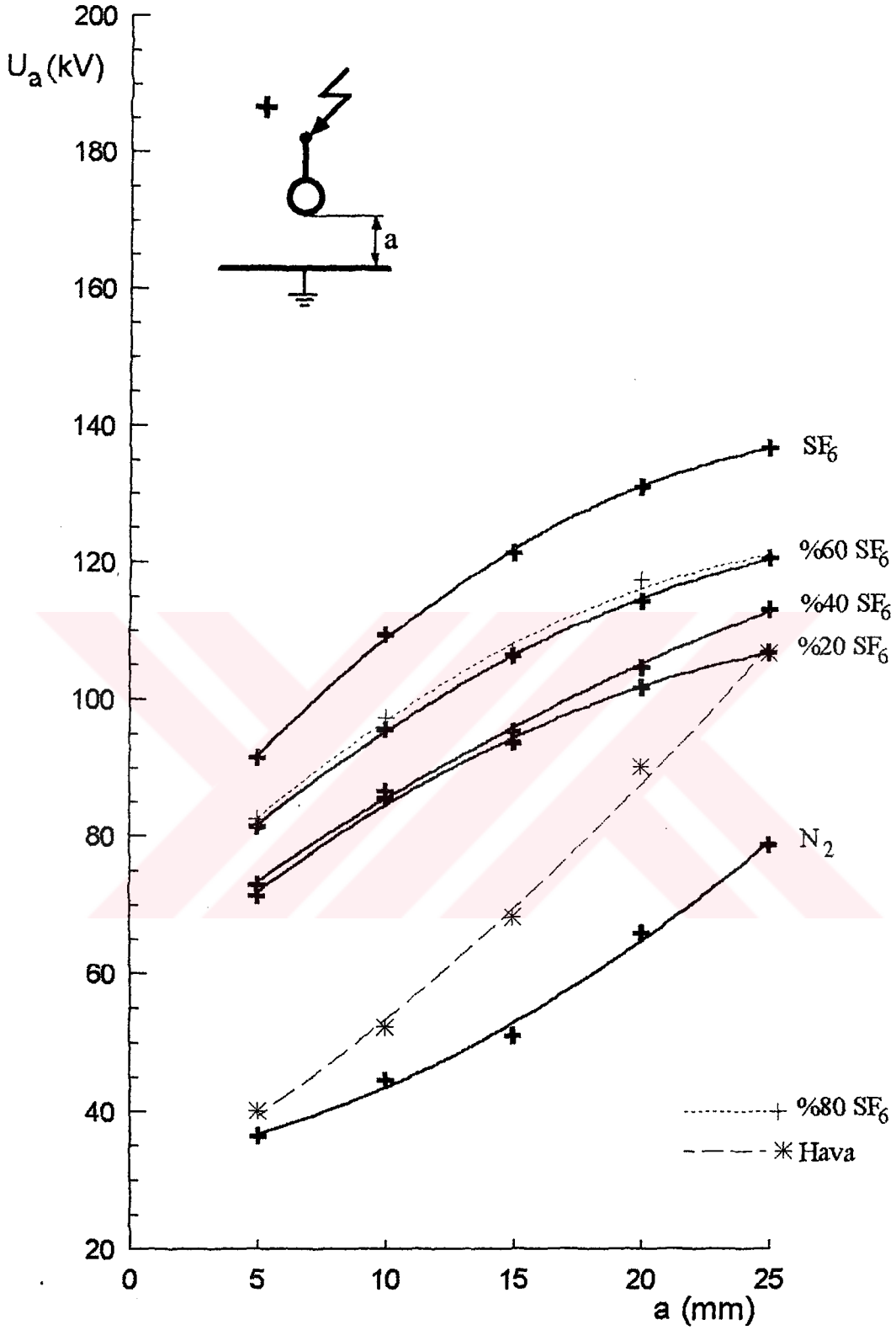
Şekil 6.10. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 2 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



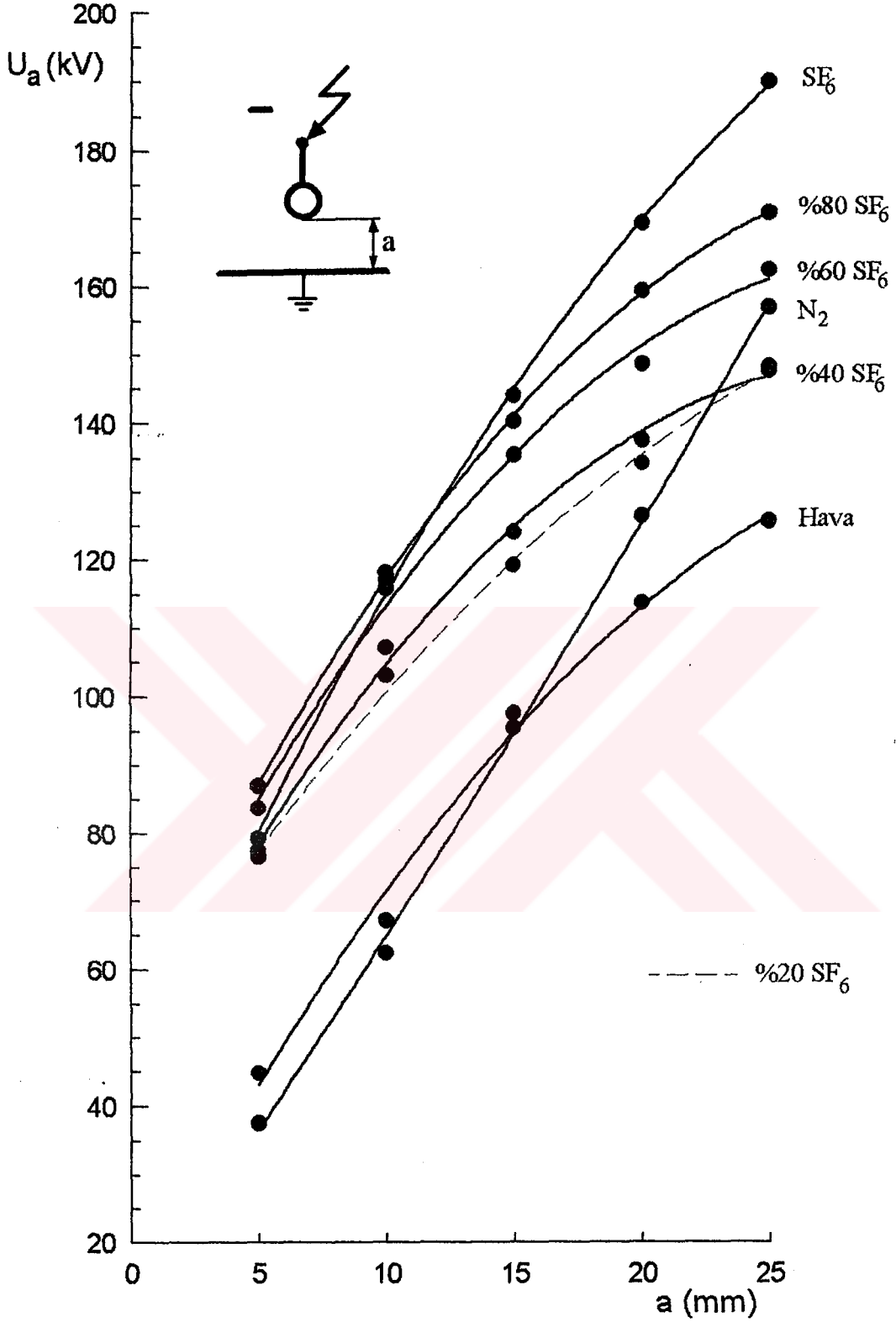
Şekil 6.11. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 2 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



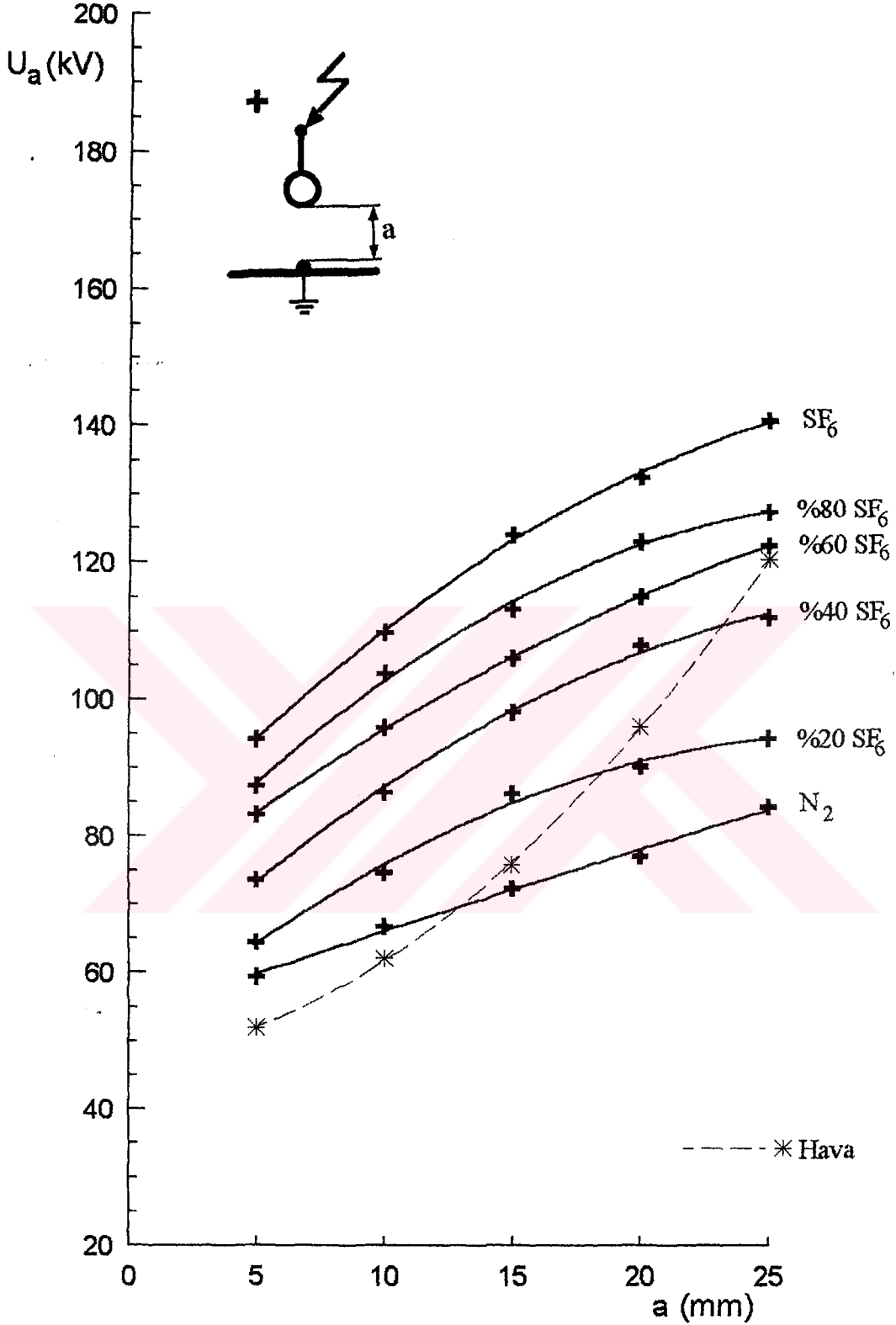
Şekil 6.12. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 2 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



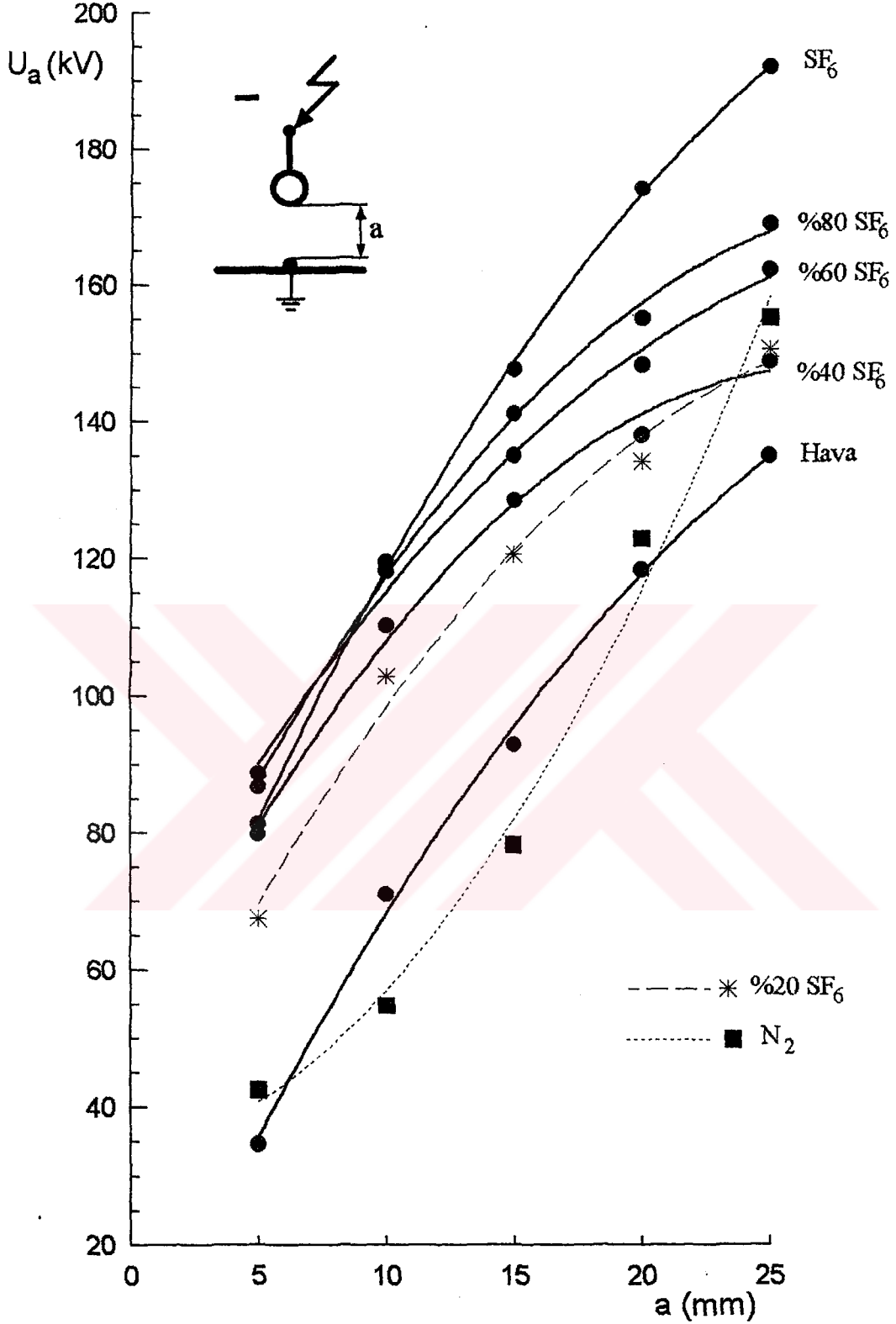
Şekil 6.13. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 3 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



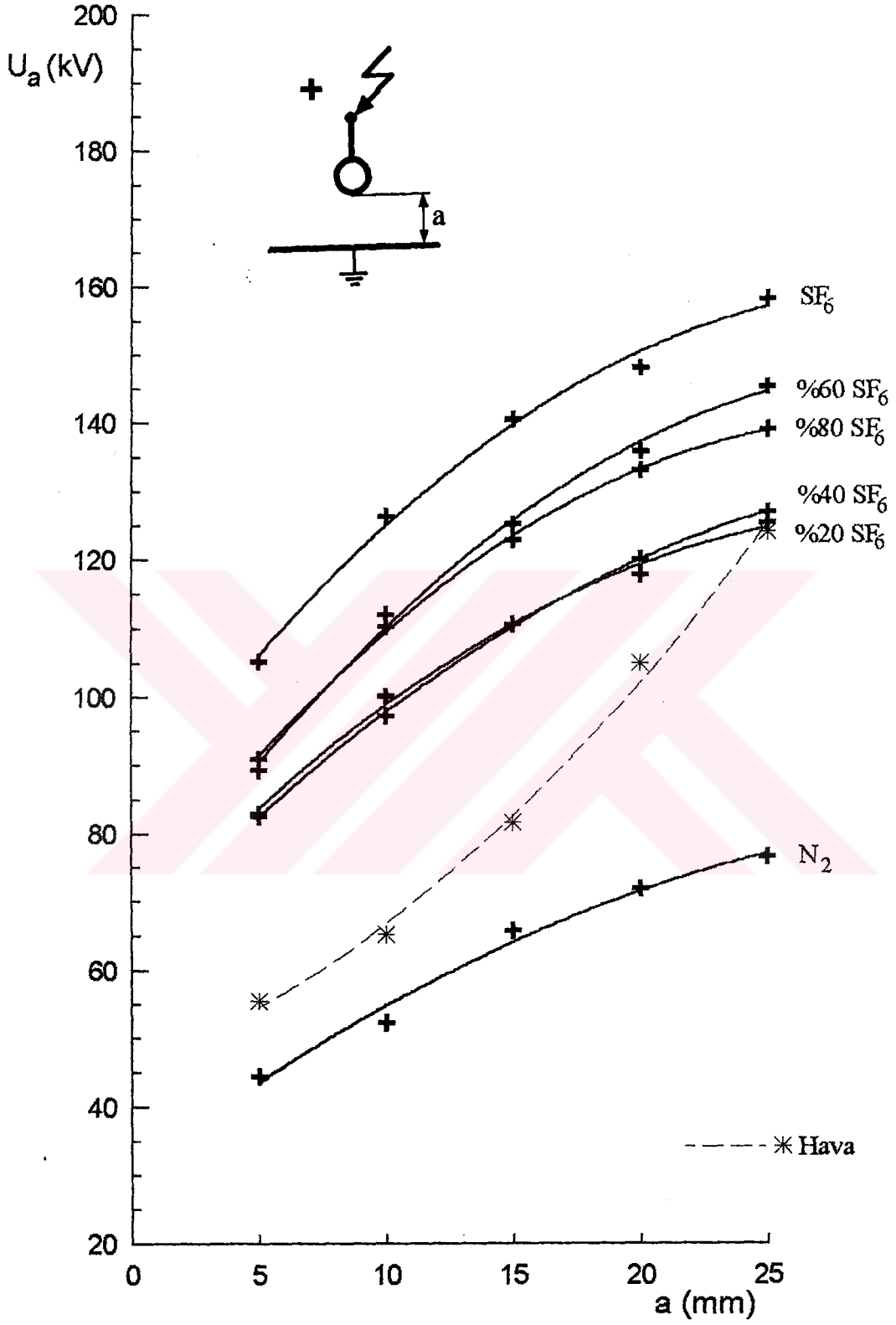
Şekil 6.14. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 3 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



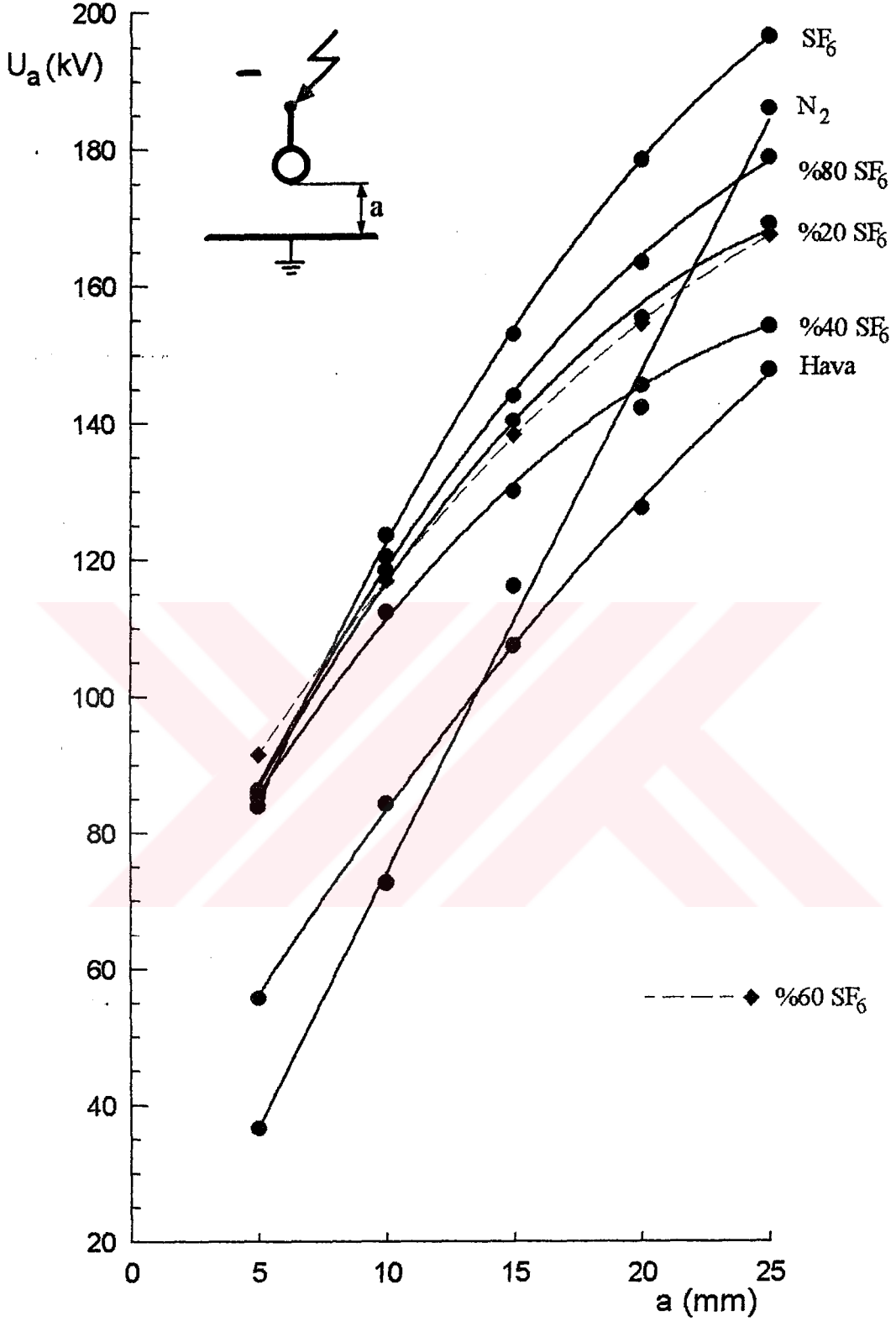
Şekil 6.15. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 3 bar'da pozitif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



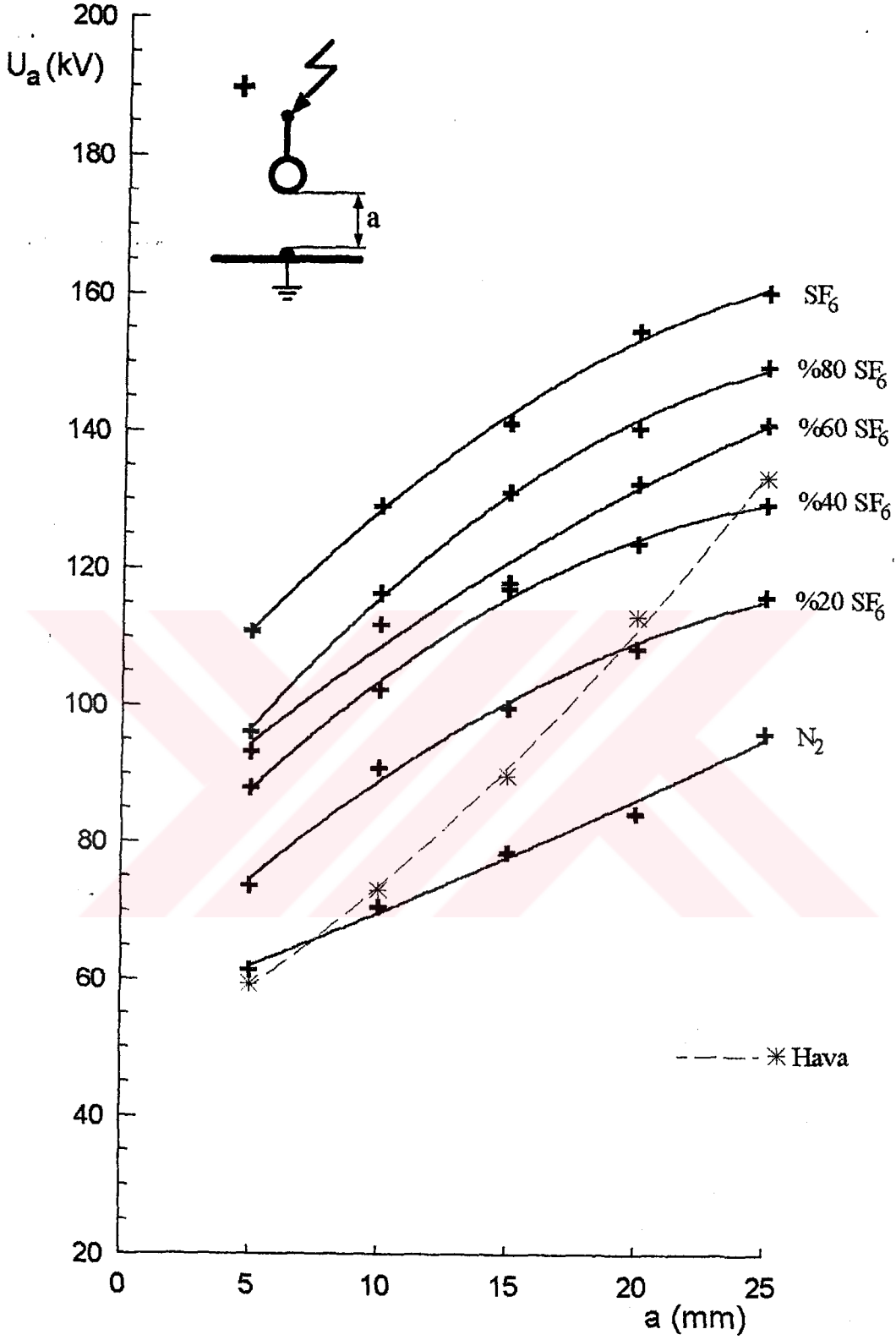
Şekil 6.16. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 3 bar'da negatif darbe delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



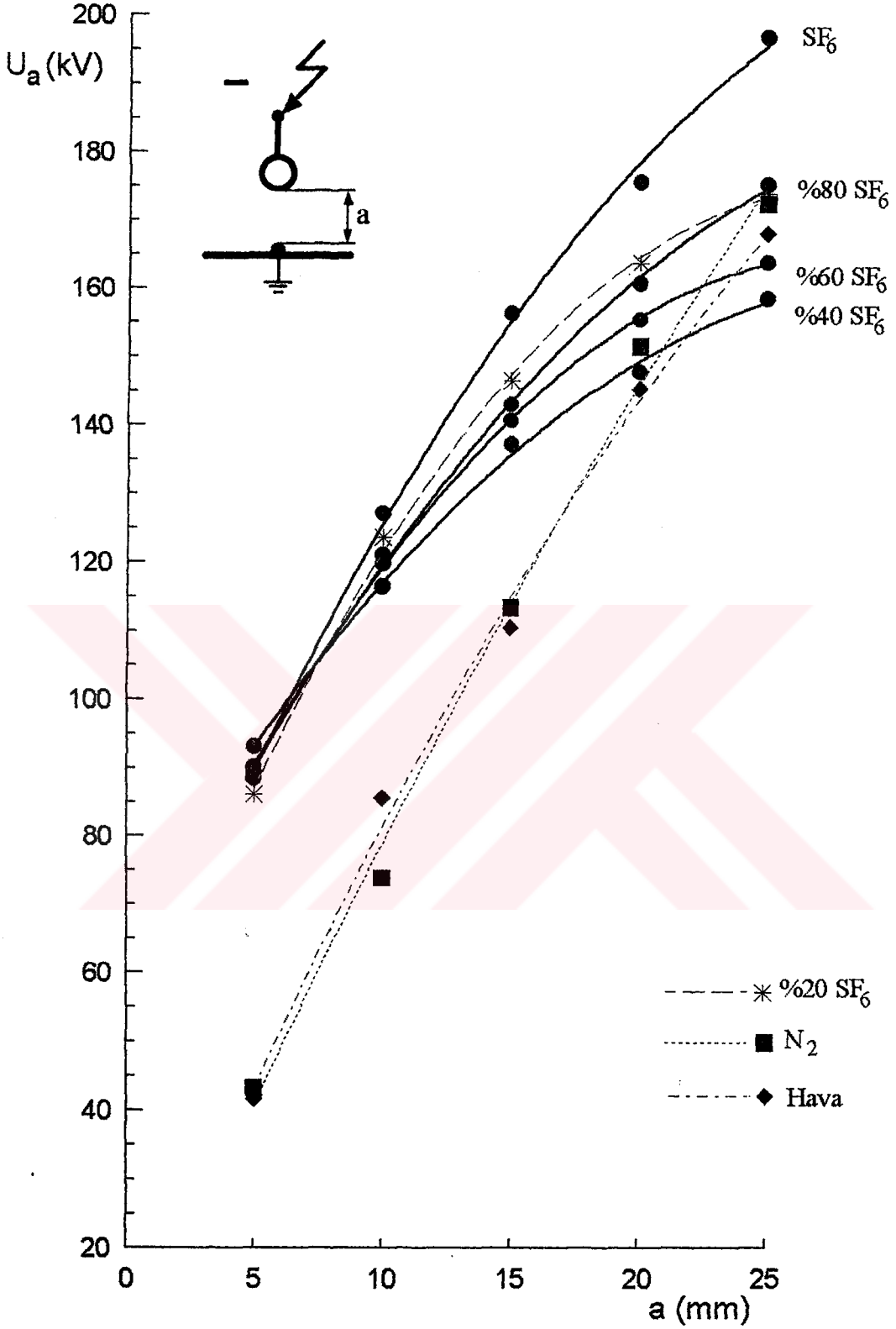
Şekil 6.17. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 4 bar'da pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.18. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 4 bar'da negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması.



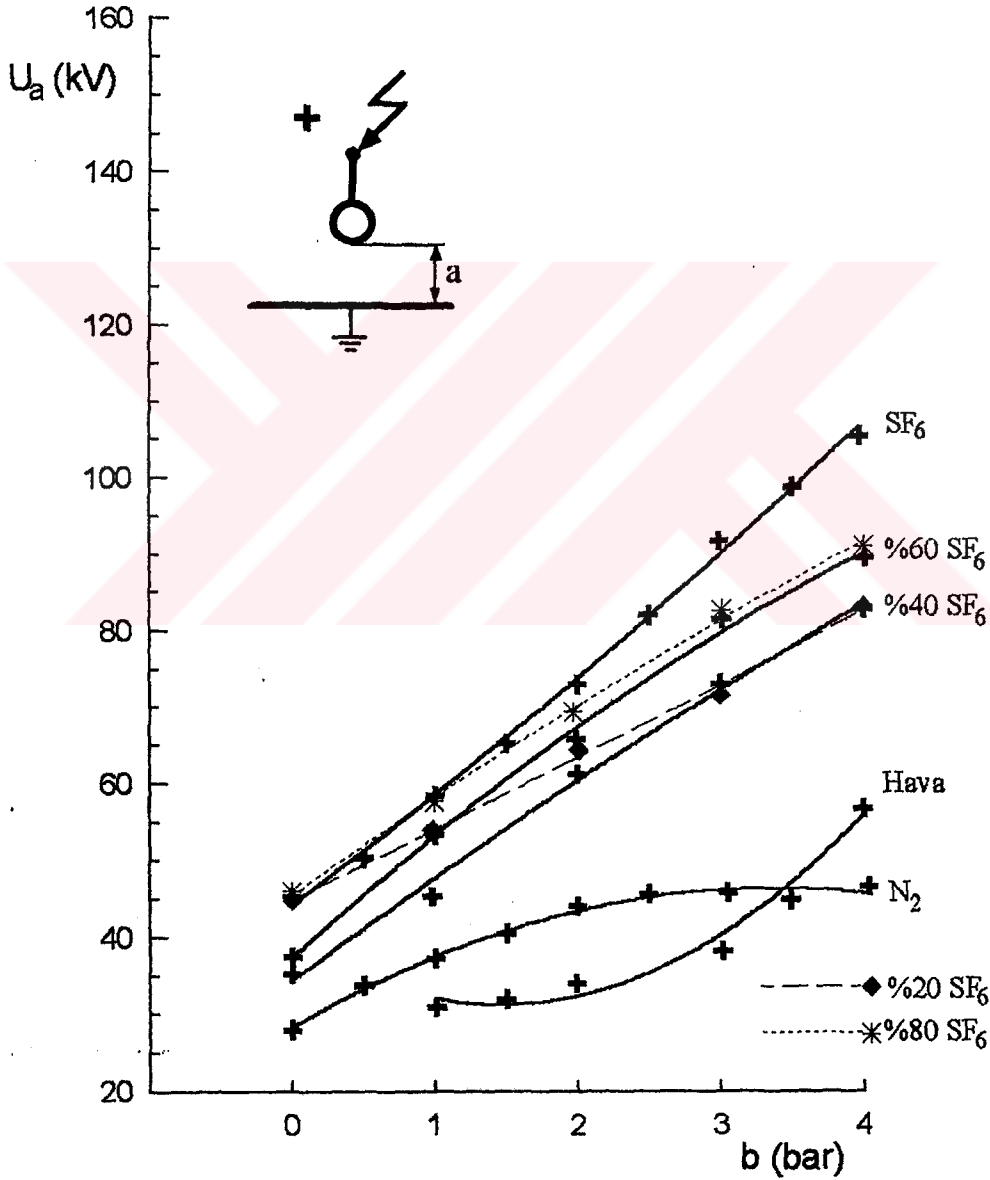
Şekil 6.19. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 4 bar'da pozitif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



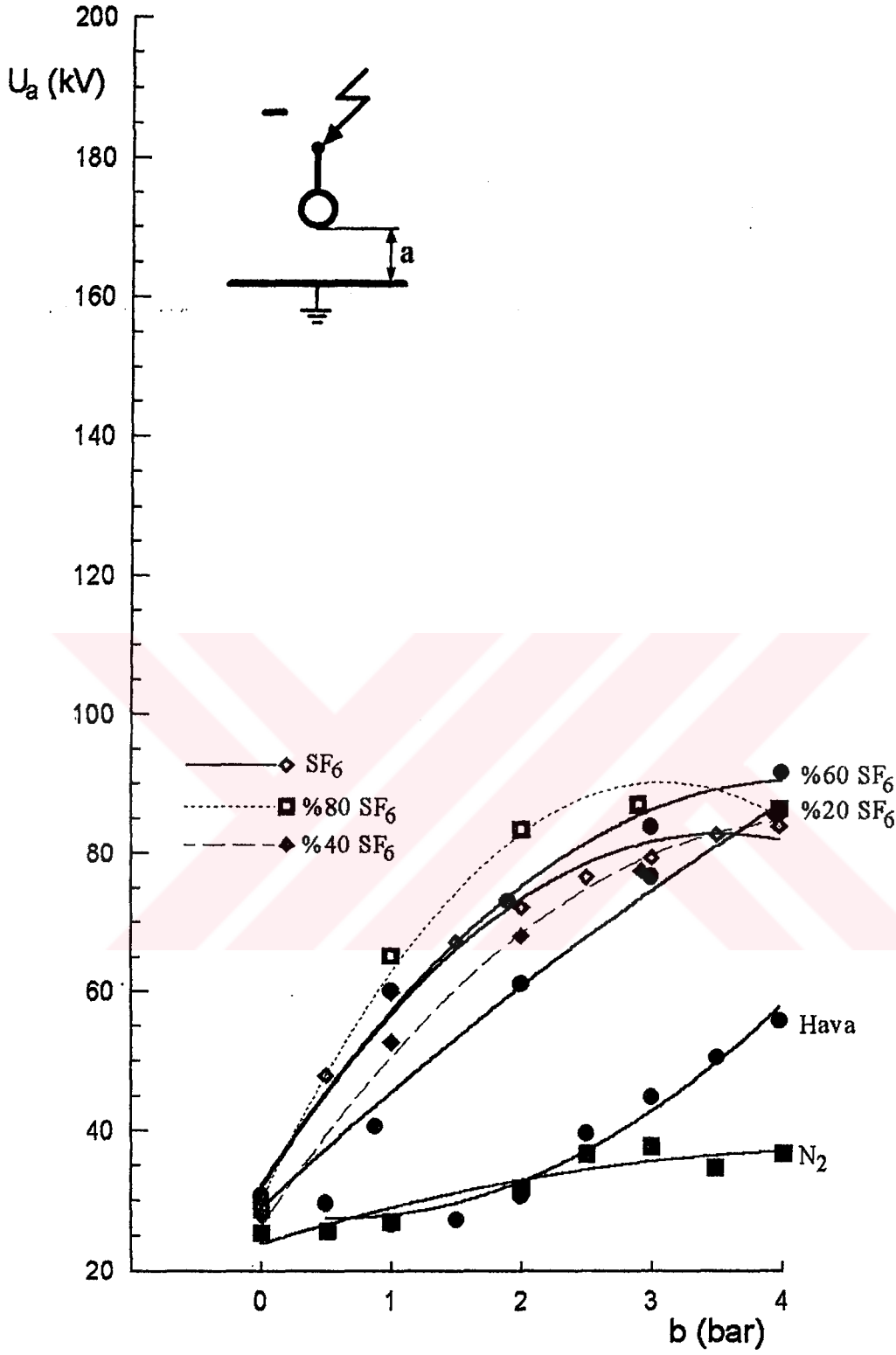
Şekil 6.20. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 4 bar'da negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).

6. 2. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için sabit elektrot açıklıklarında darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması

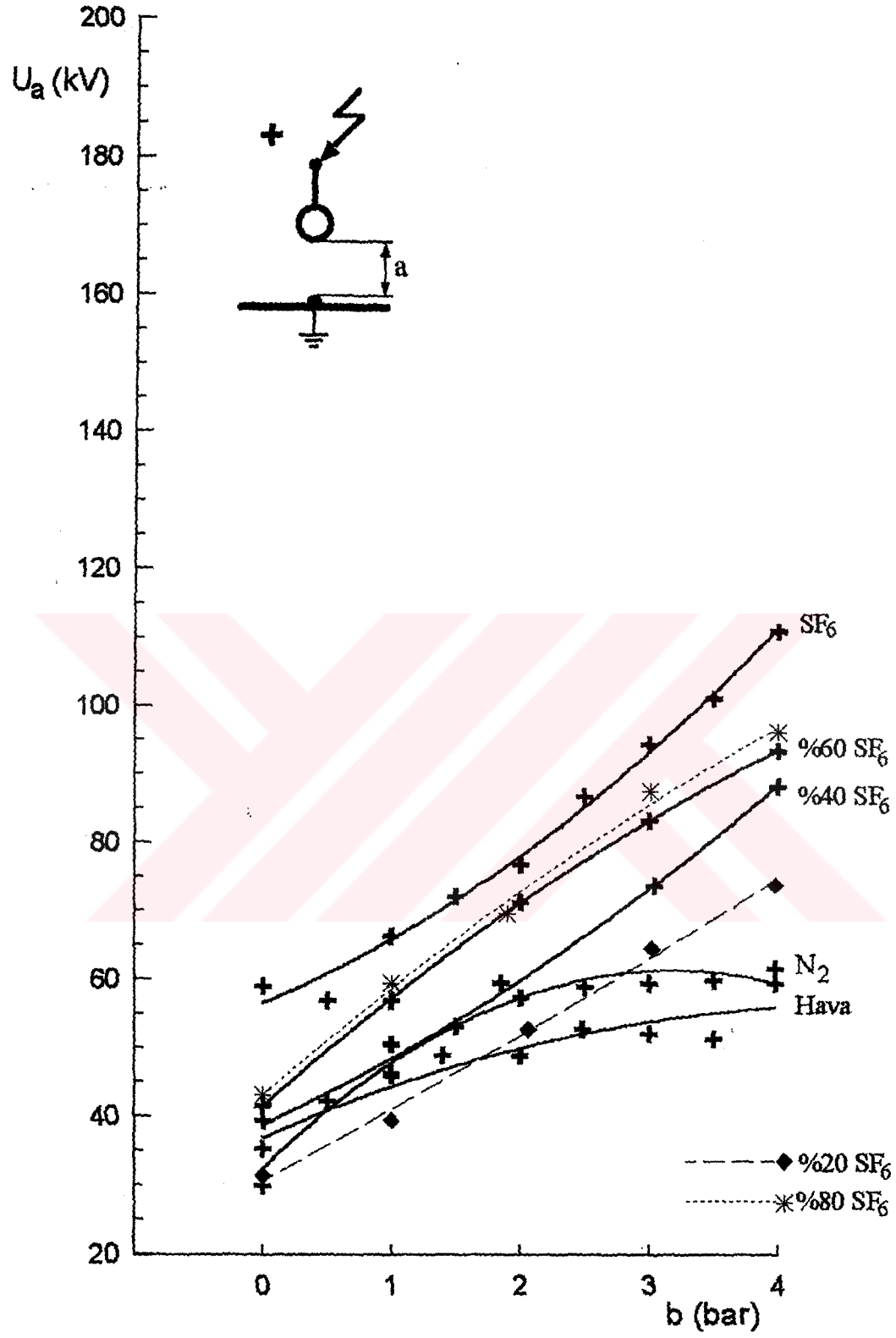
Burada da hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için sabit ($a=5-10-15-20-25$ mm) elektrot açıklıklarında darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri karşılaştırma amacıyla bir arada verilmiştir. Şekil 6.21-6.24'te $a=5$ mm'de, Şekil 6.25-6.28'de $a=10$ mm'de, Şekil 6.29-6.32'de $a=15$ mm'de, Şekil 6.33-6.36'da $a=20$ mm'de ve Şekil 6.37-6.40'ta $a=25$ mm'de darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırmaları gösterilmiştir.



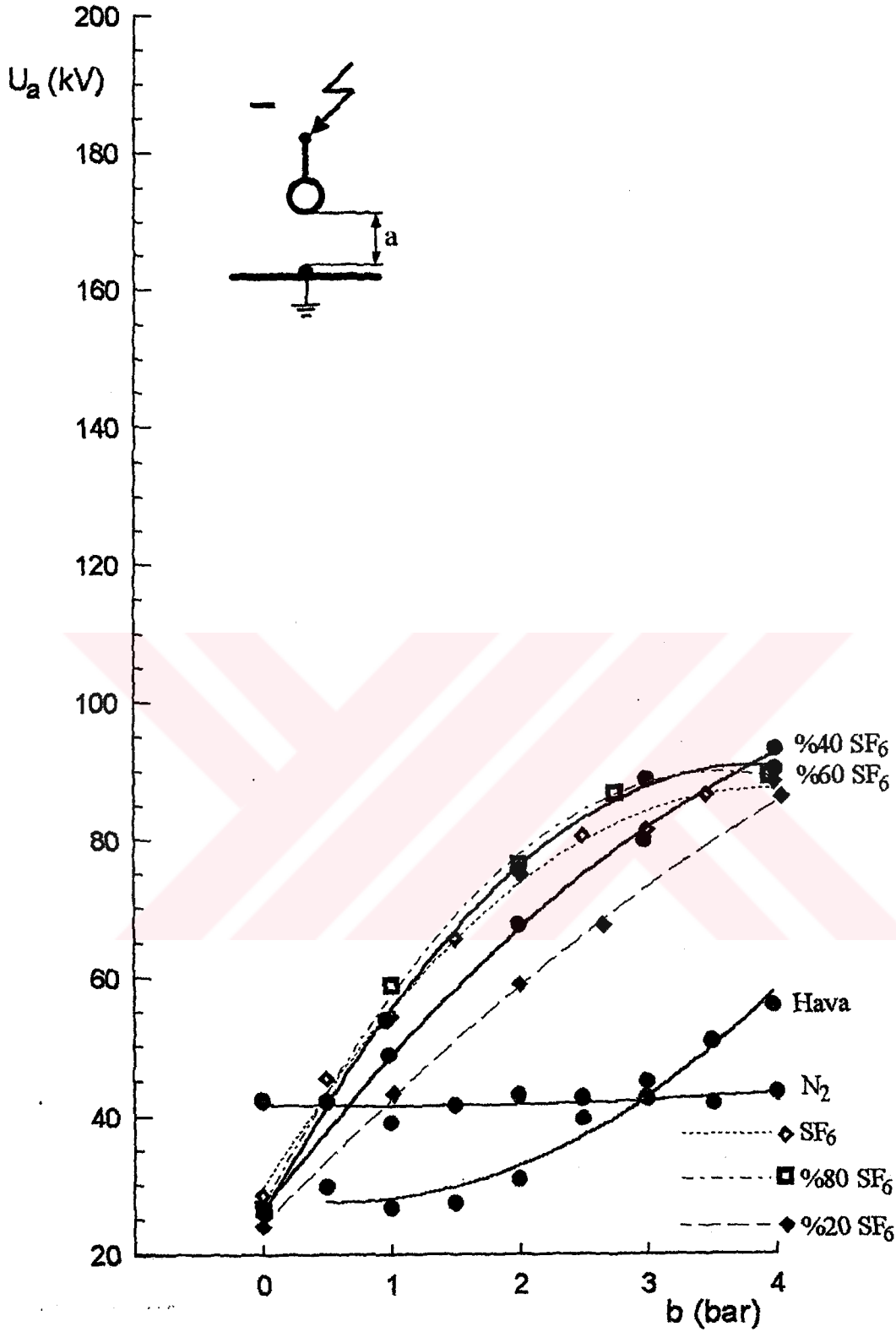
Şekil 6.21. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



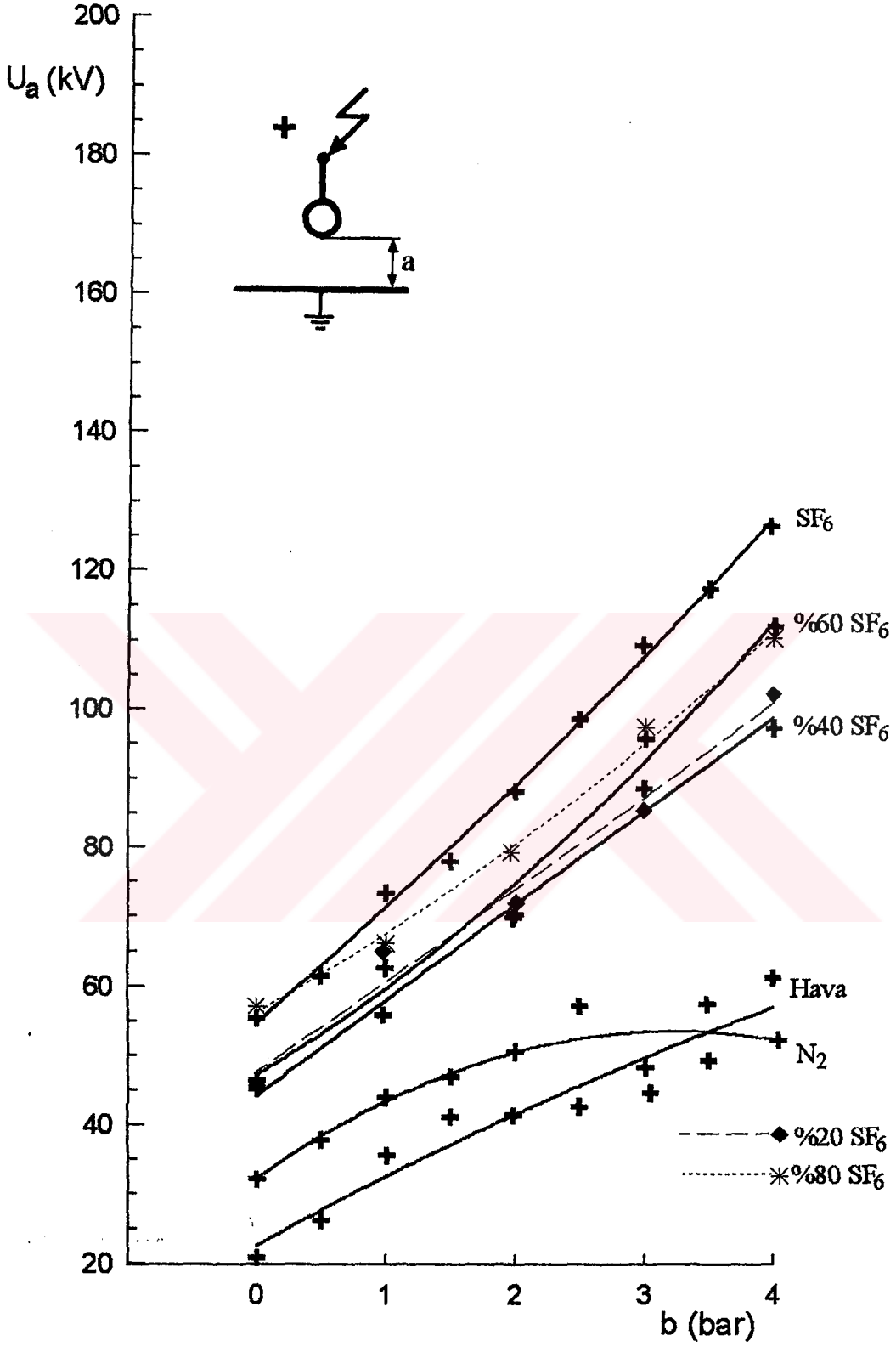
Şekil 6.22. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



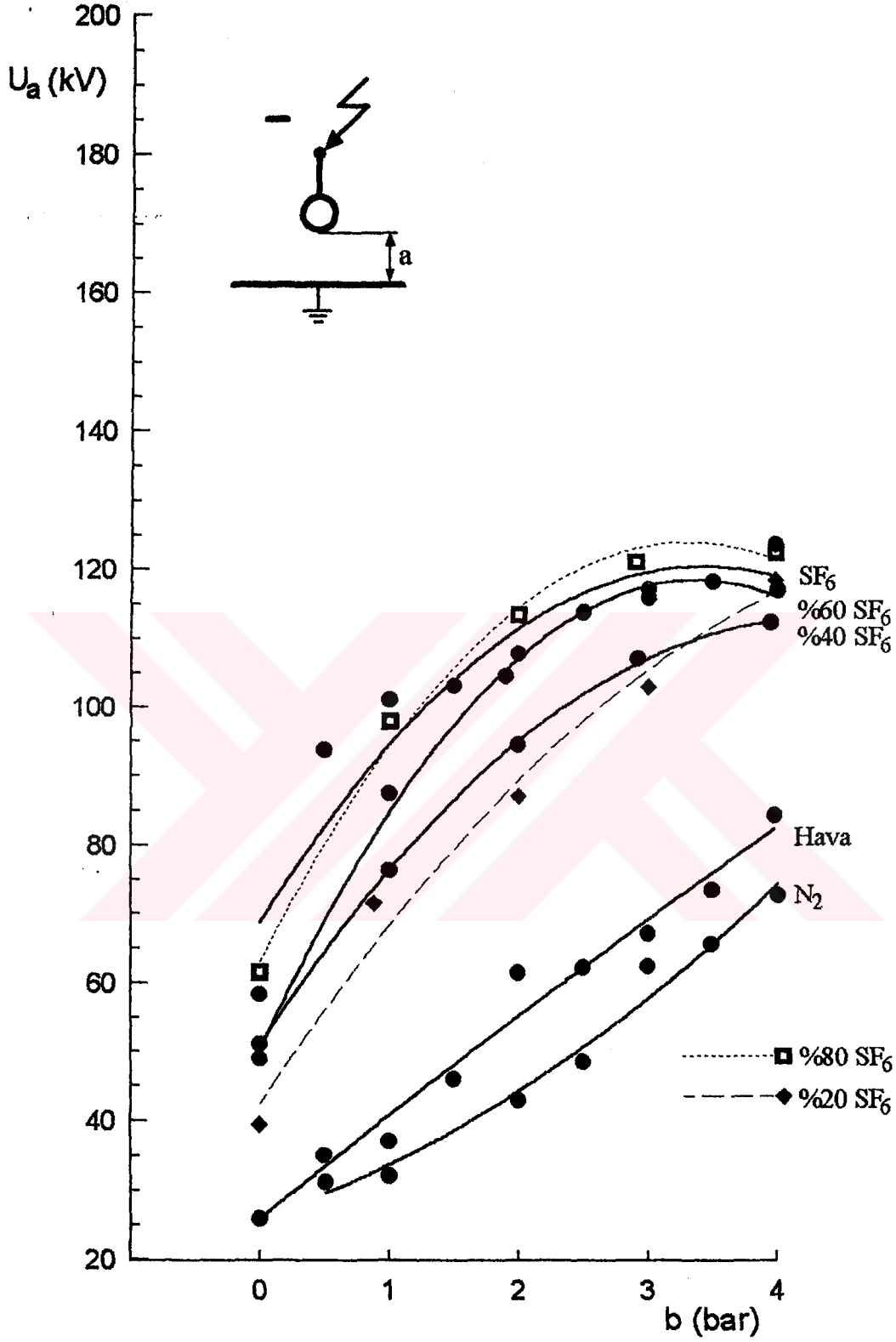
Şekil 6.23. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme geriliminin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



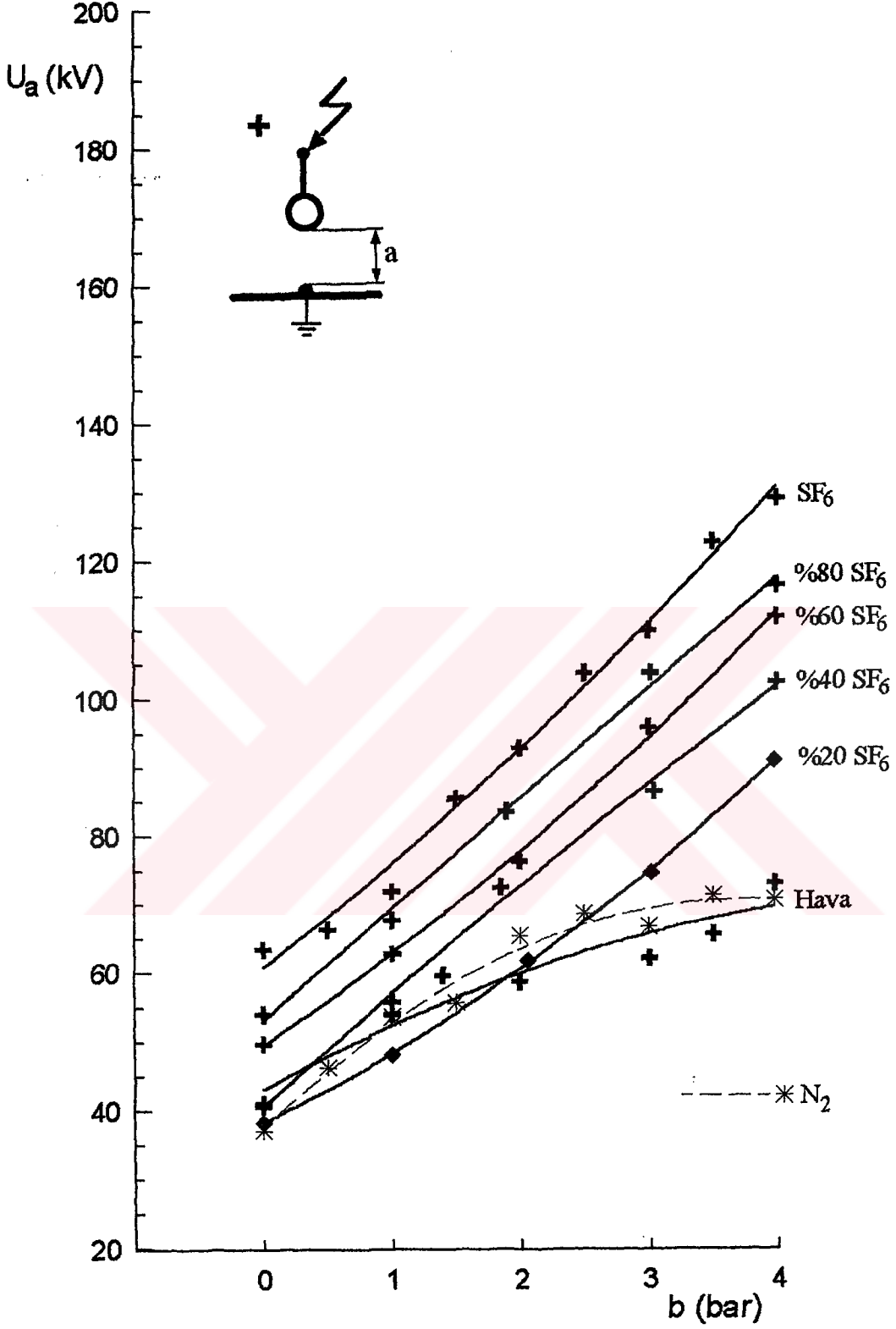
Şekil 6.24. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 5 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme geriliminin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



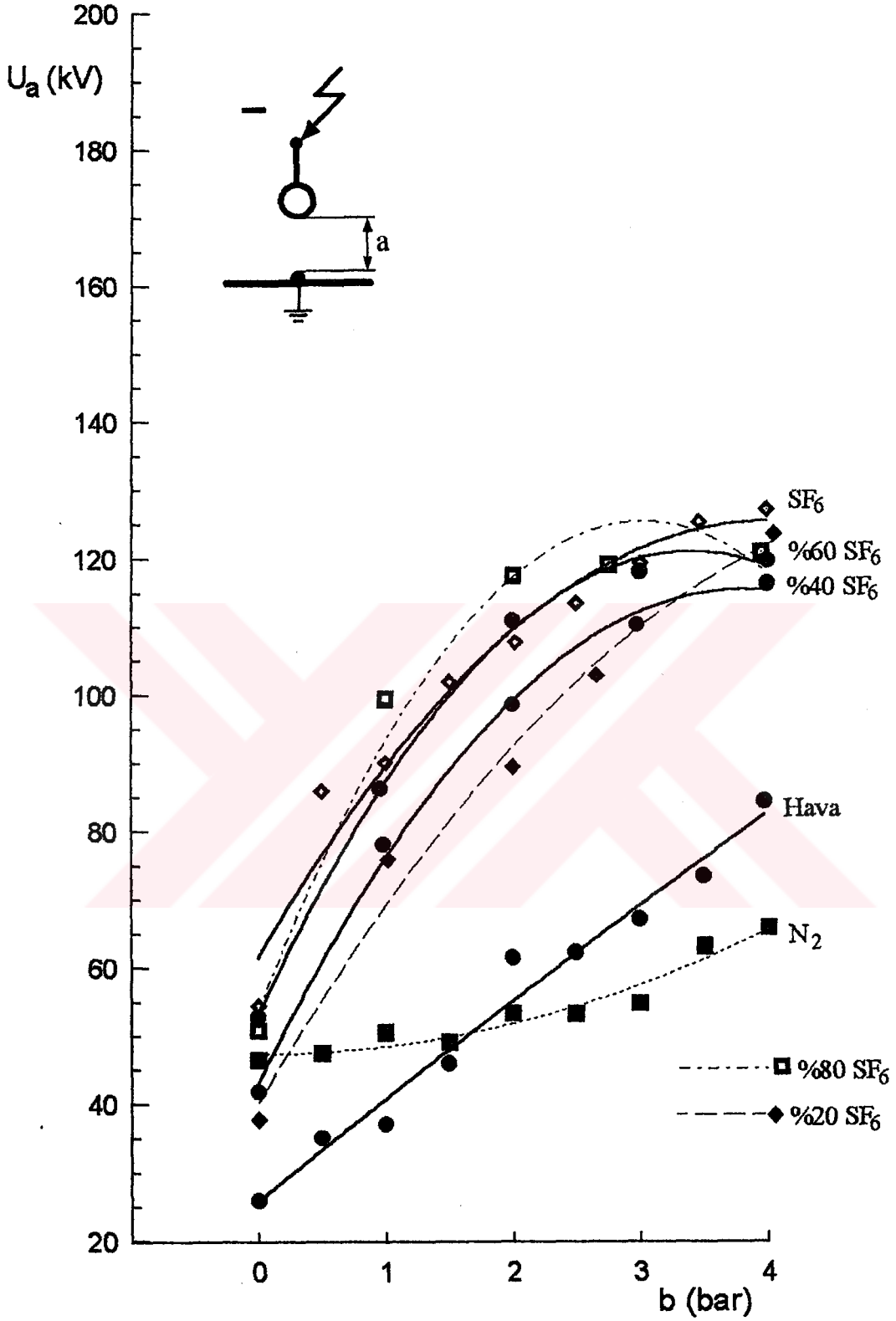
Şekil 6.25. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



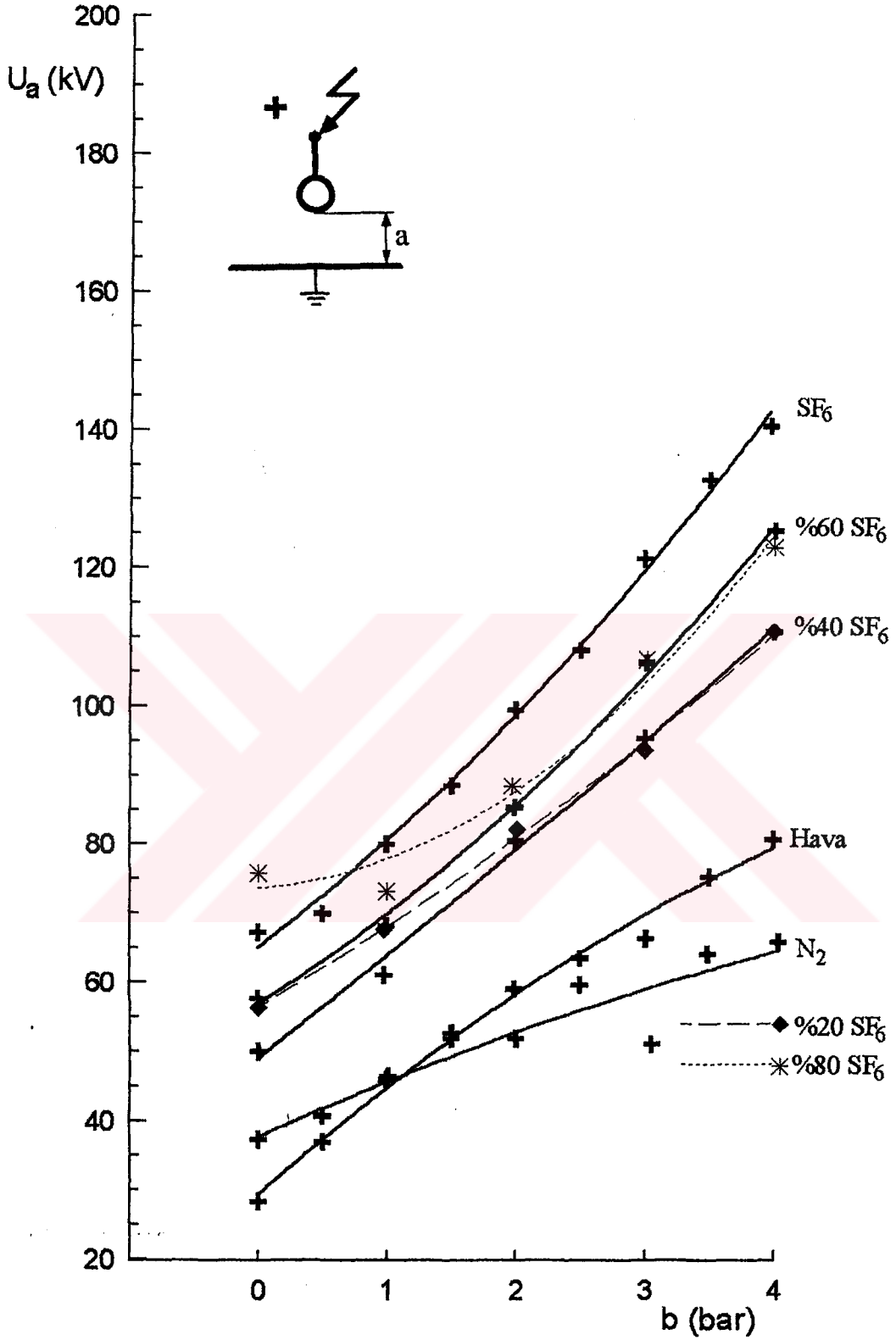
Şekil 6.26. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



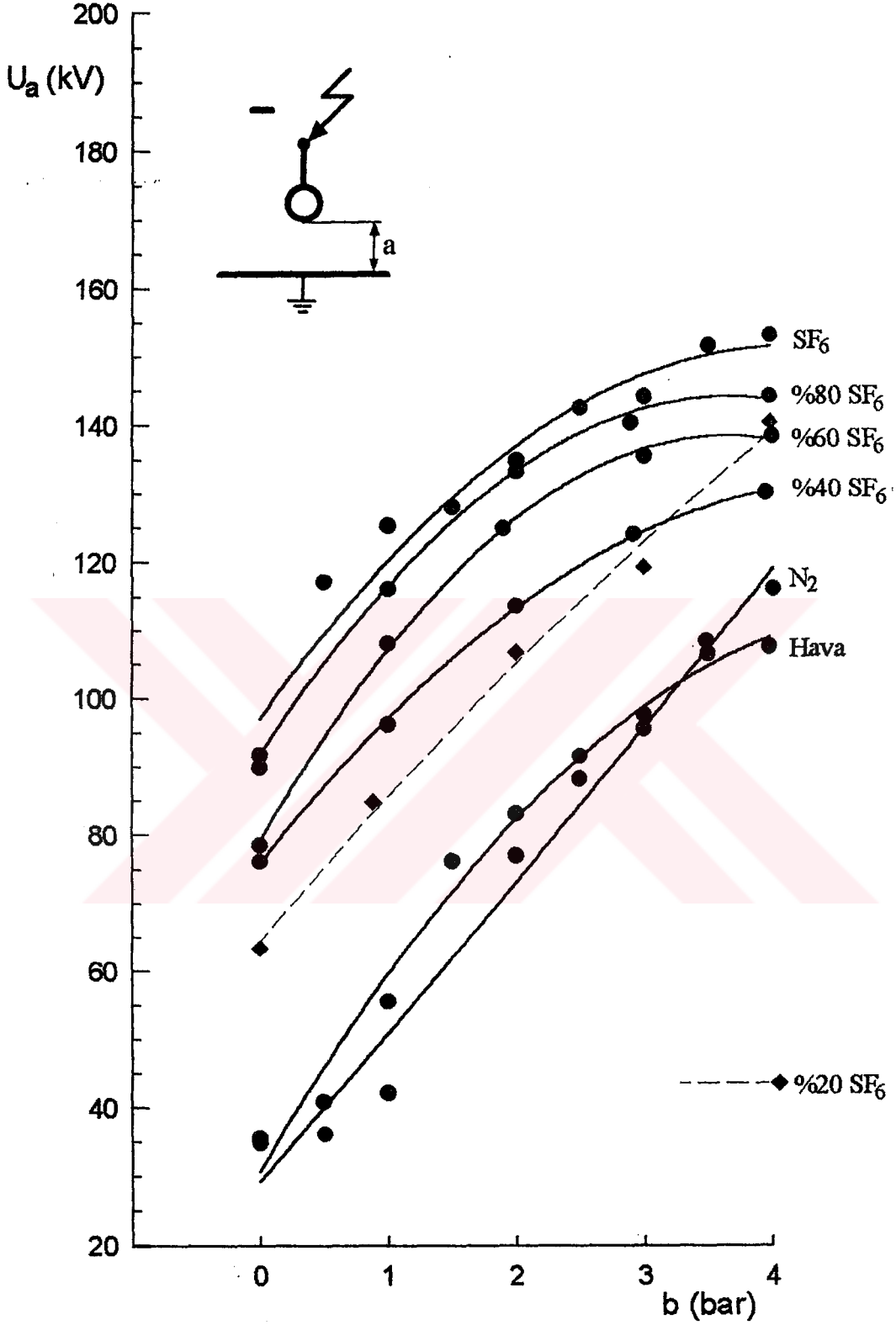
Şekil 6.27. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



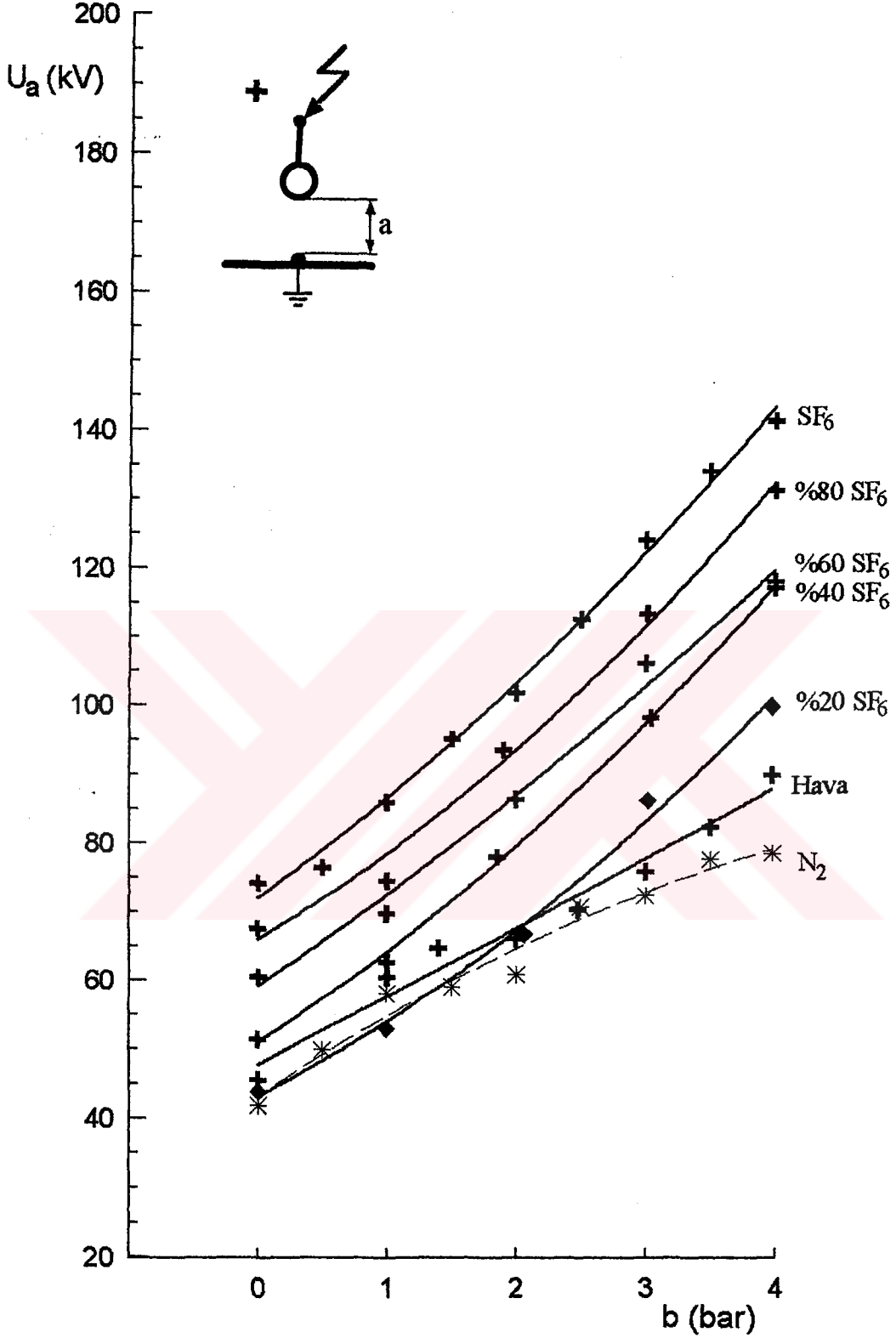
Şekil 6.28. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 10 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



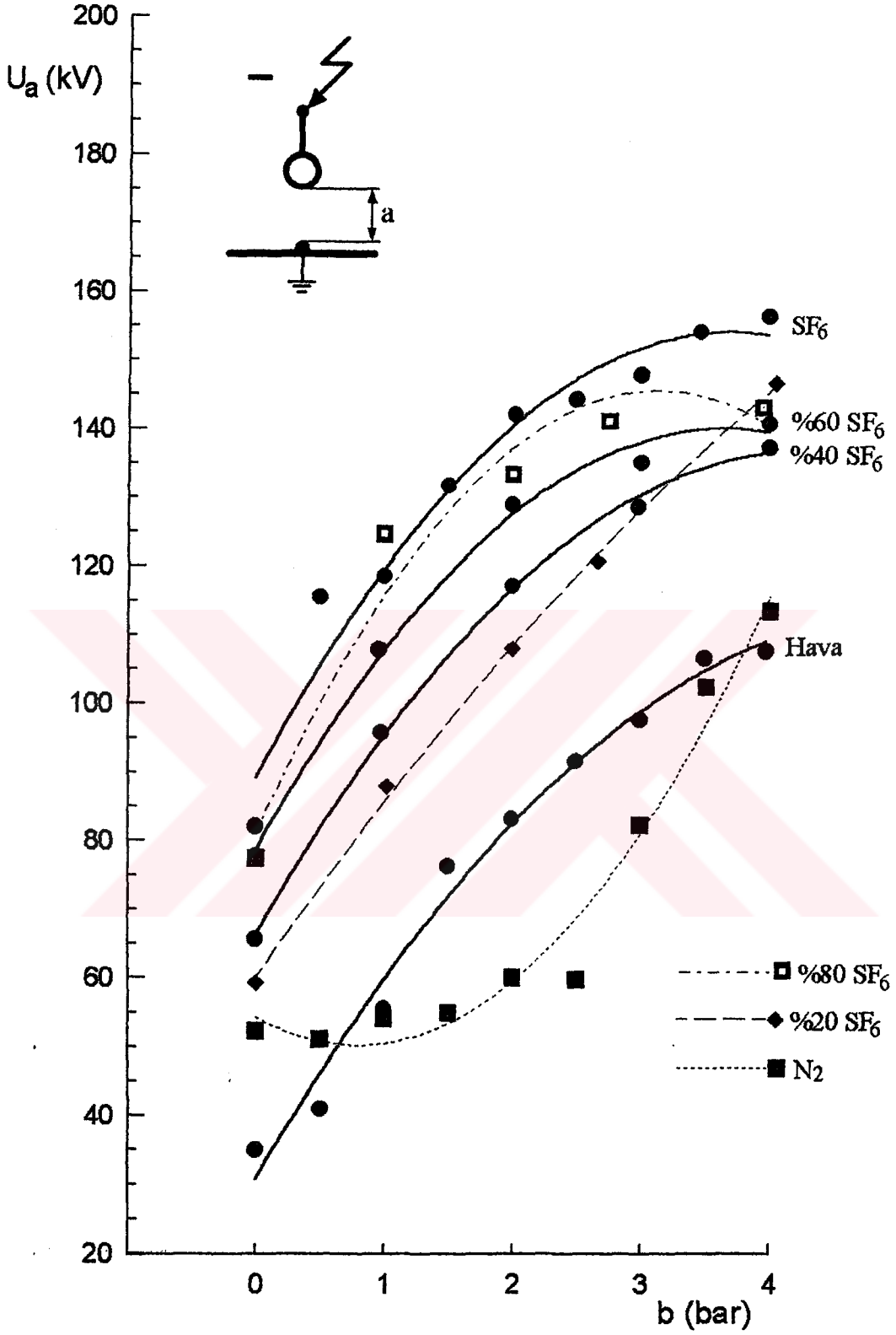
Şekil 6.29. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



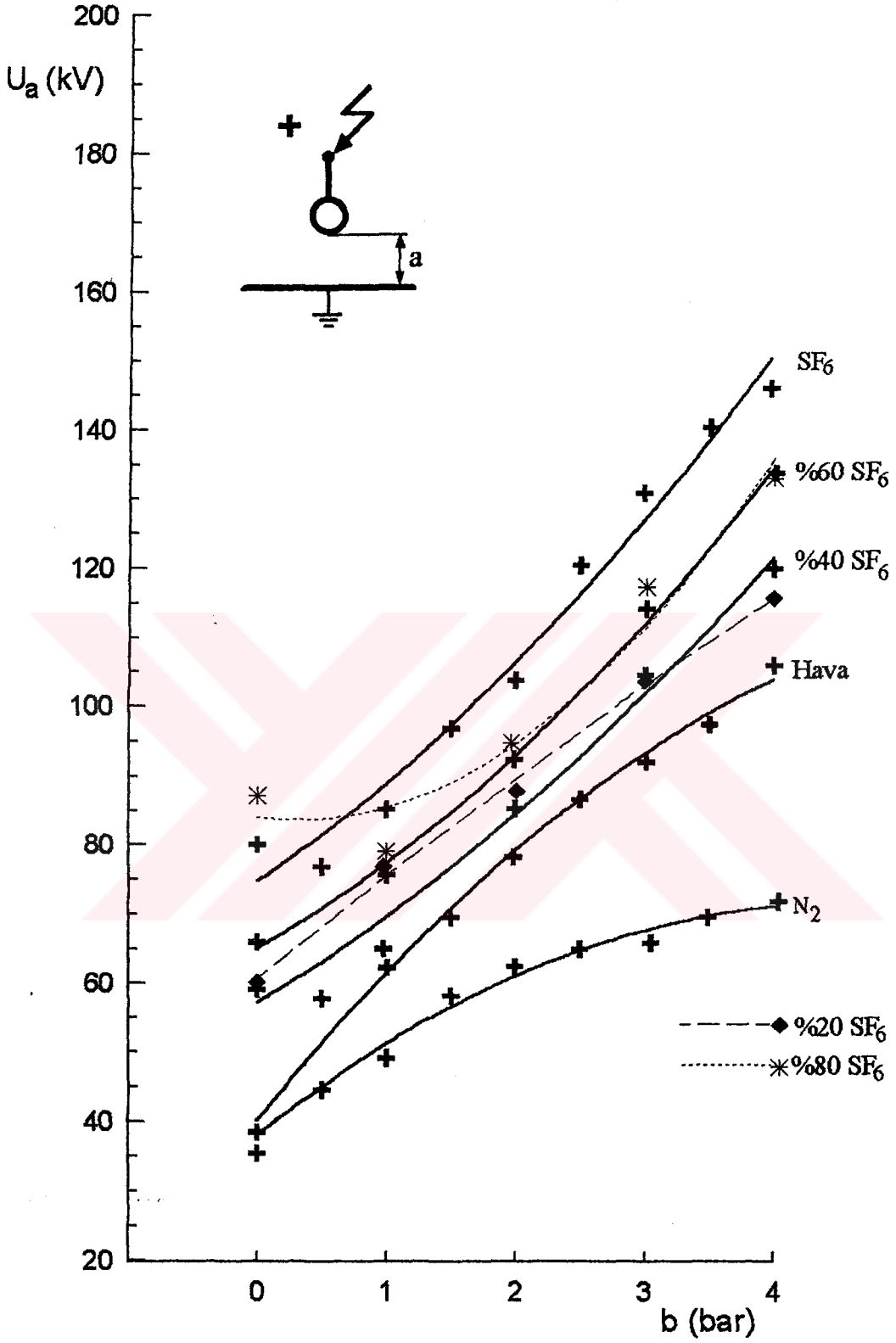
Şekil 6.30. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



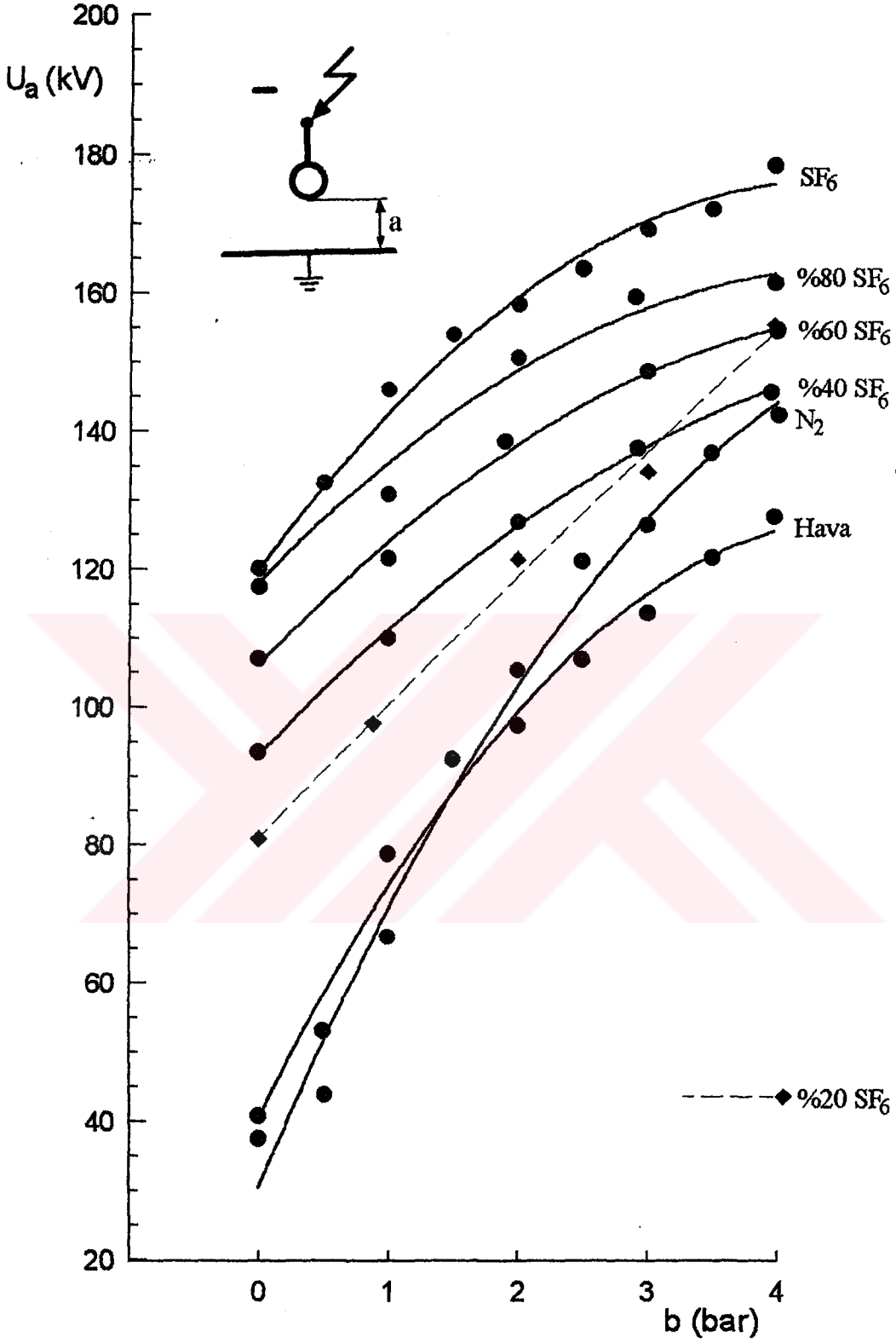
Şekil 6.31. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



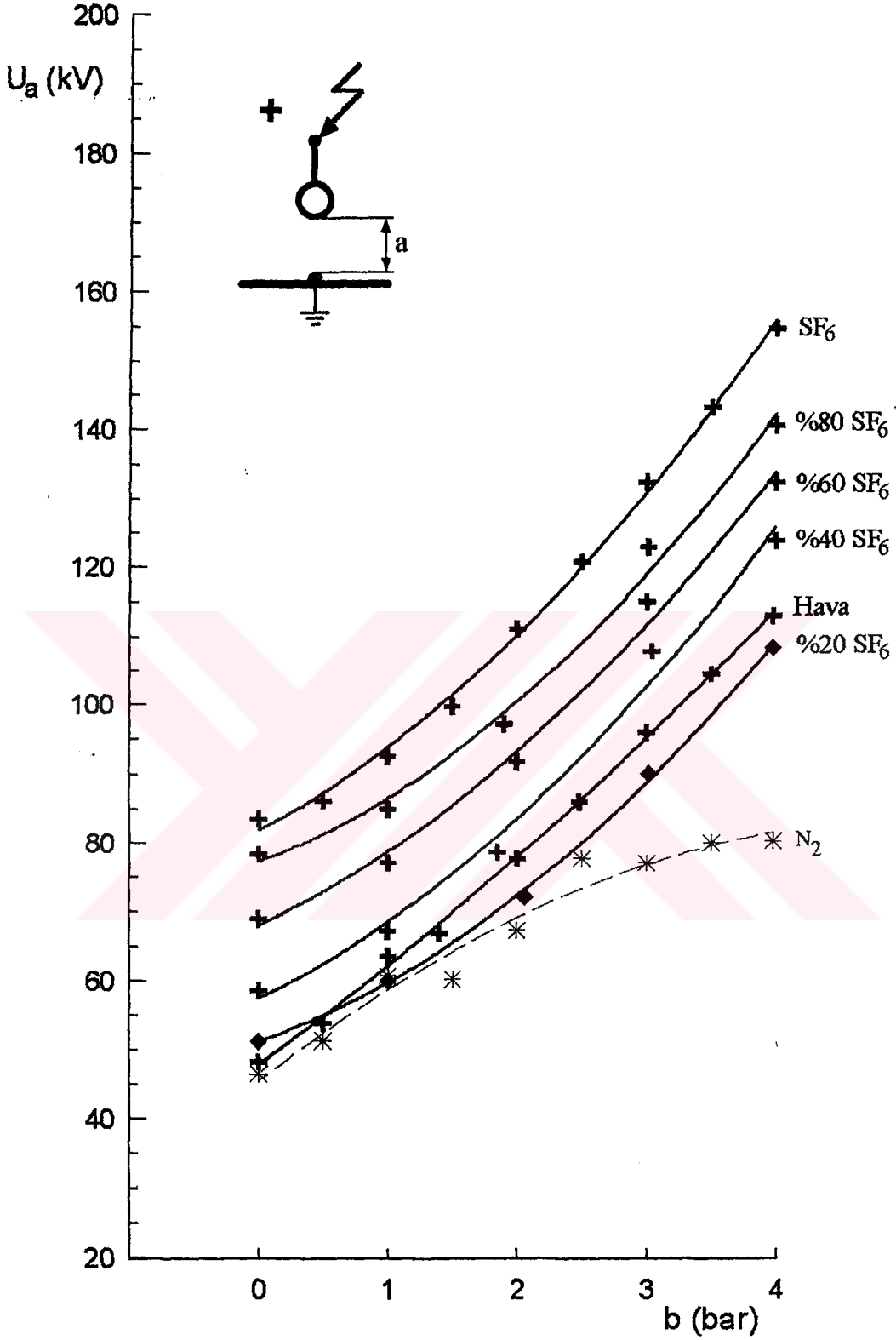
Şekil 6.32. Hava, N₂, SF₆ ve SF₆+N₂ gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 15 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



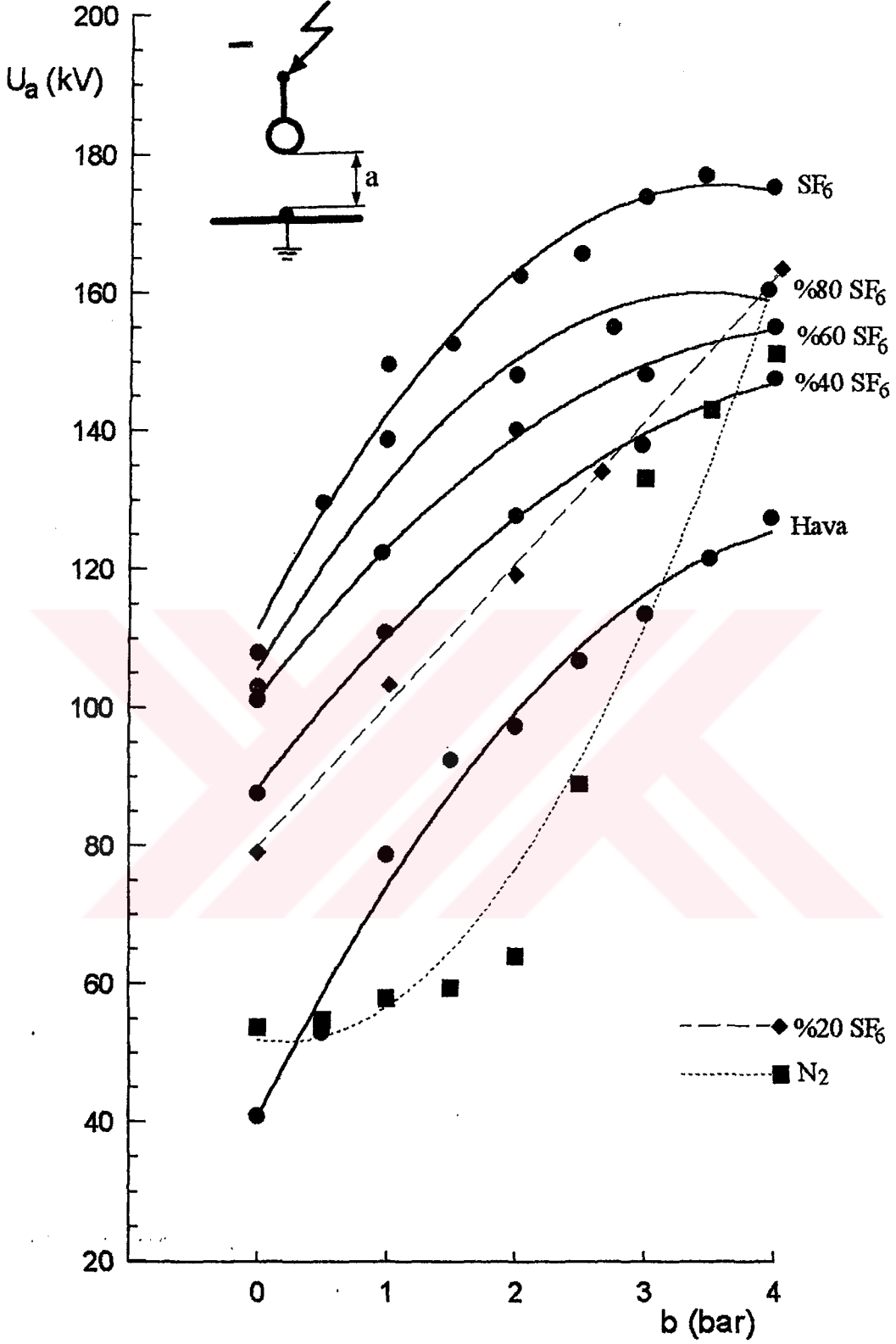
Şekil 6.33. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



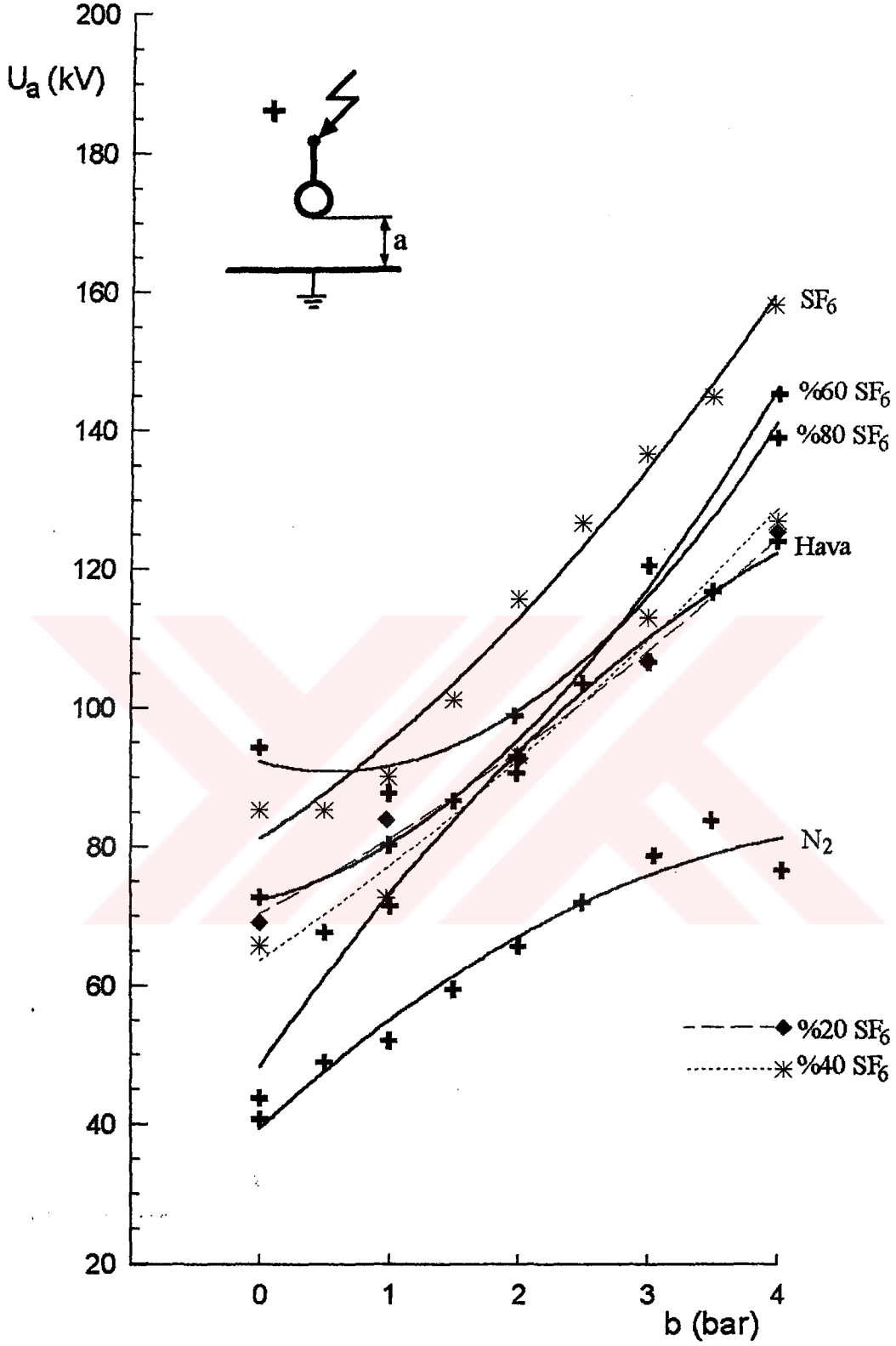
Şekil 6.34. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



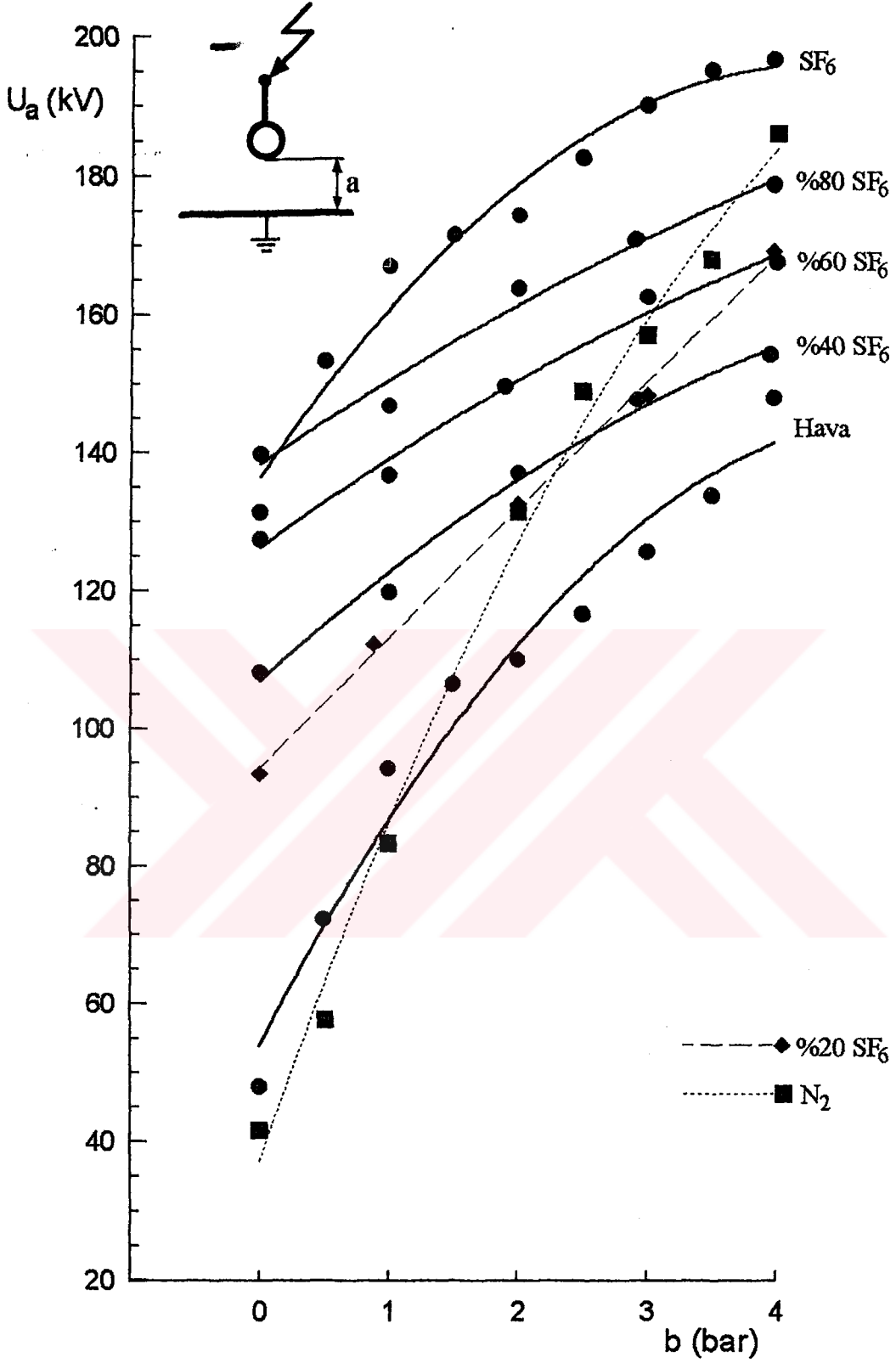
Şekil 6.35. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



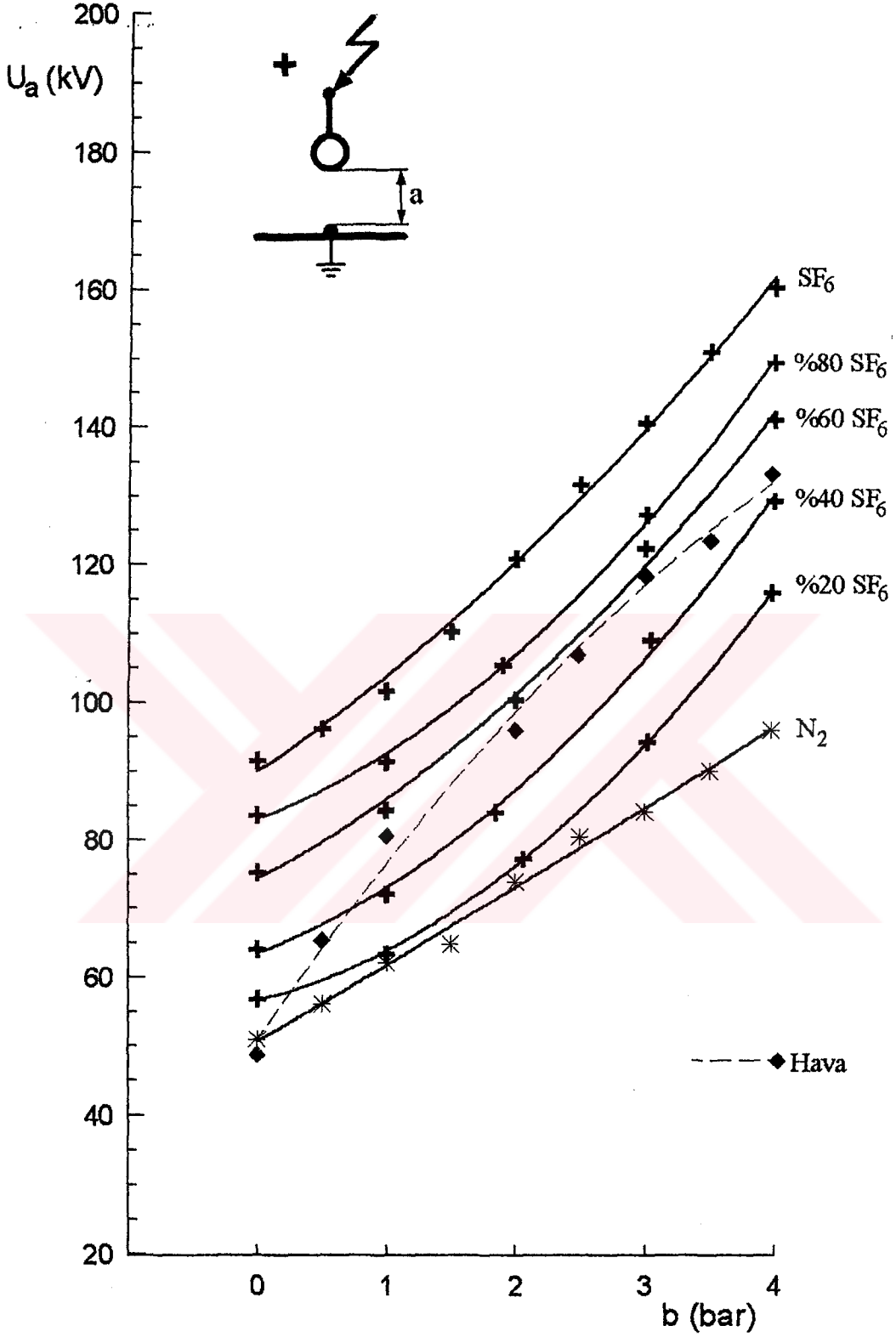
Şekil 6.36. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 20 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



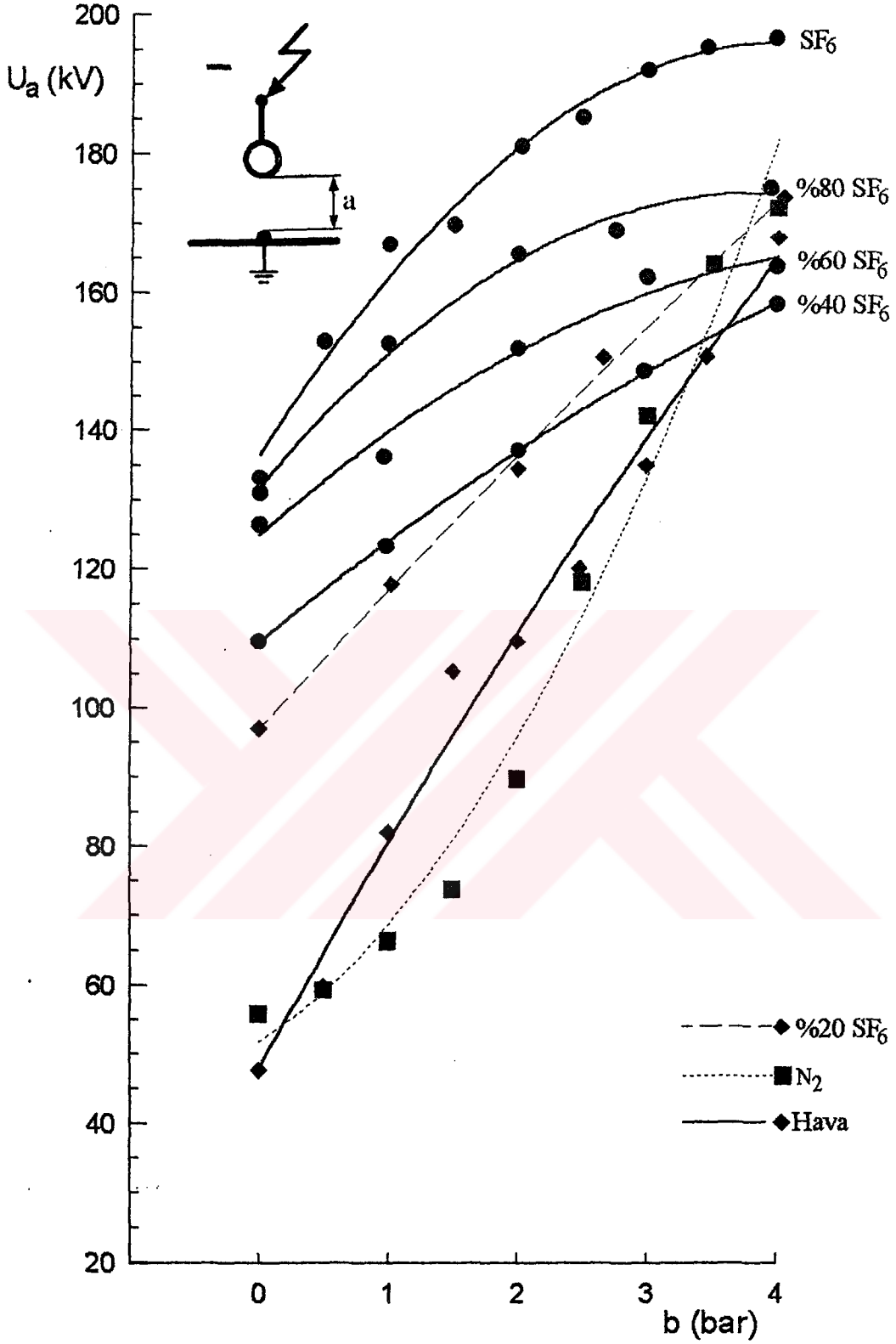
Şekil 6.37. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.38. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.39. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).



Şekil 6.40. Hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için 4 mm çaplı küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında negatif darbe delinme gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması (pürüz yarıçapı 1 mm).

BÖLÜM 7

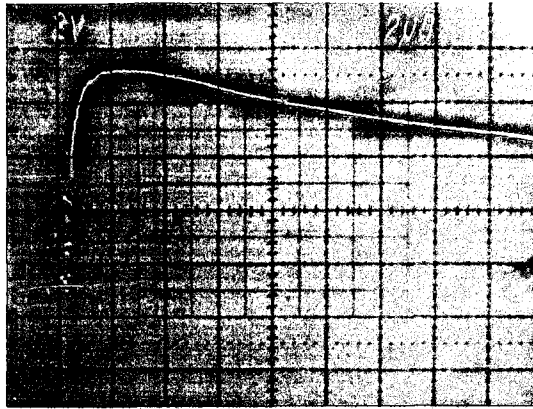
GERİLİM ve AKIM OSİLOGRAMLARI ve BOŞALMA FOTOĞRAFLARI

Bu bölümde, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında 0 bar basıncındaki hava, 0 bar ve 1 bar basınçlarındaki SF₆'da pozitif ve negatif kutbiyetteki standart (1,2/50 µs) darbe gerilimlerinde osiloskop yardımıyla alınan osilogramlar ve boşalma fotoğrafları verilerek, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

7.1. Osilogramlar ve Boşalma Fotoğrafları

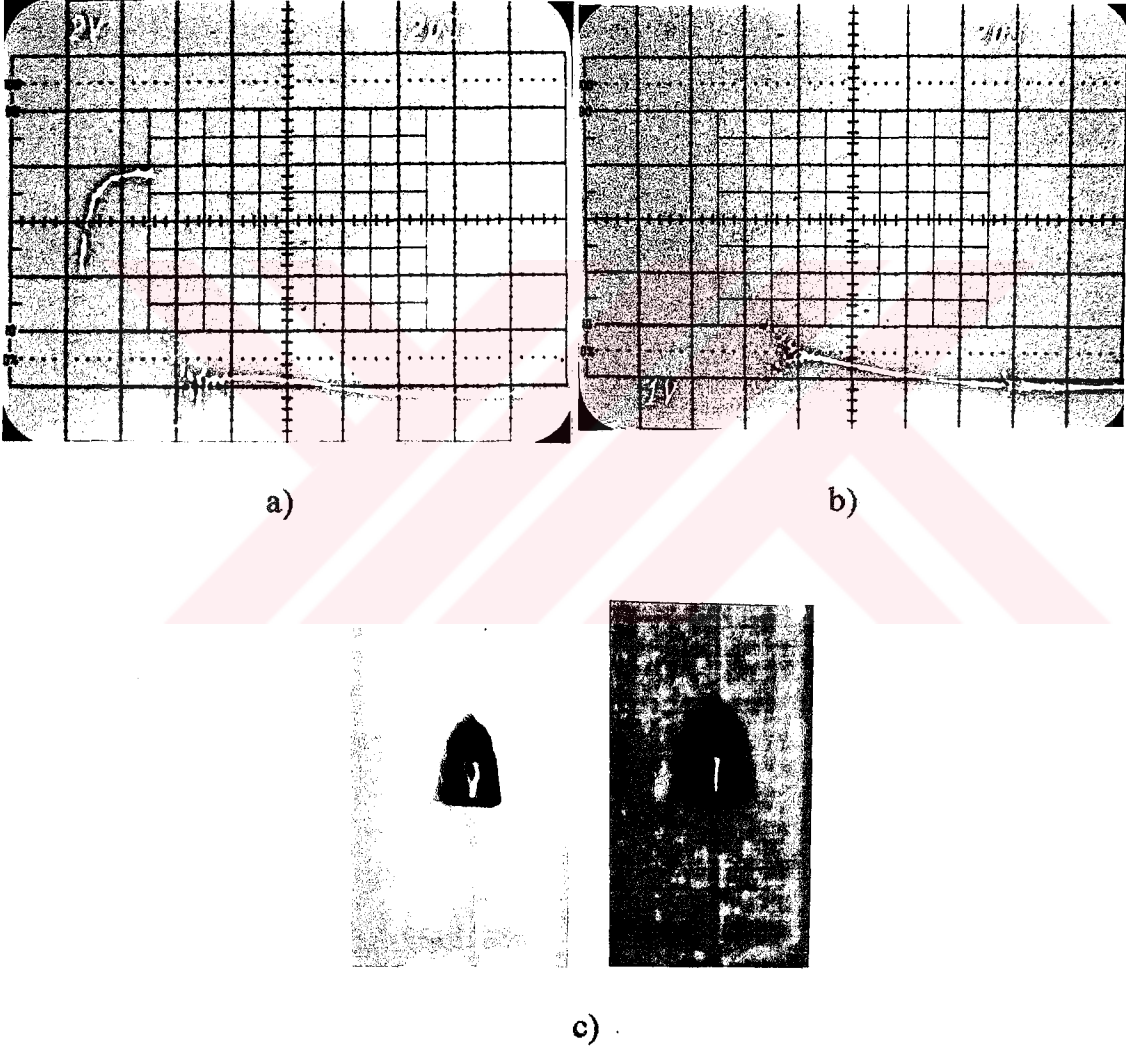
Küre-düzlem elektrot sisteminde pürüz etkisinin görülmesi amaçlandığından, osilogramlar ve boşalma fotoğrafları, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde alınmıştır. Osilogramların alınmasında, Tektronix 7623 A marka 20 MHz band genişlikli analog hafızalı osiloskoptan yararlanılmıştır. Boşalmada pürüz etkisinin belirgin olması için elektrot açıklığı 25 mm seçilmiştir.

Şekil 7.1'de örnek olarak, deneylerde yararlanılan darbe üreticinden elde edilen 90 kV'luk pozitif standart darbe geriliminin osiloskop ekranından alınan osilogramı verilmiştir.

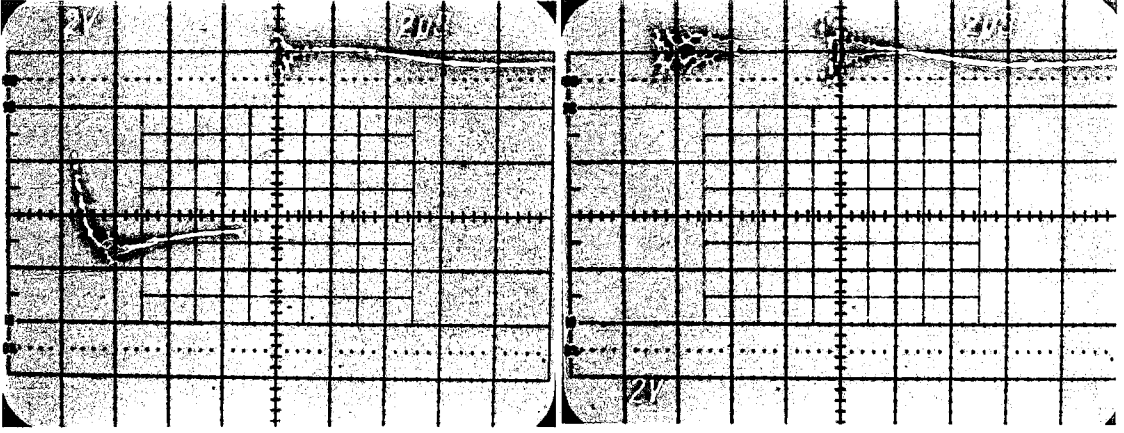


Şekil 7.1. Standart darbe gerilimi osilogramı.

Akım osilogramlarının alınması amacıyla pürüzlü düzlem elektrot ile toprak arasına $0,1 \Omega$ değerindeki bir direnç bağlanmıştır. Boşalma anında bu direnç üzerinde oluşan gerilim düşümü, hafızalı osiloskop yardımıyla kaydedilerek, fotoğrafı çekilmiştir. Gerilim osilogramlarının alınmasında ise kapasitif gerilim bölücünün darbe voltmetresi çıkışından yararlanılmıştır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0 bar basınçlı hava için elde edilen gerilim ve akım osilogramları ile boşalma fotoğrafları, pozitif ve negatif kutbiyetler için sırasıyla şekil 7.2 ve şekil 7.3'te ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 7.2. Havada, 0 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, pozitif darbeye ($a = 25 \text{ mm}$)
a) Darbe gerilimi osilogramı,
b) Akım osilogramı,
c) Boşalma fotoğrafları.



a)

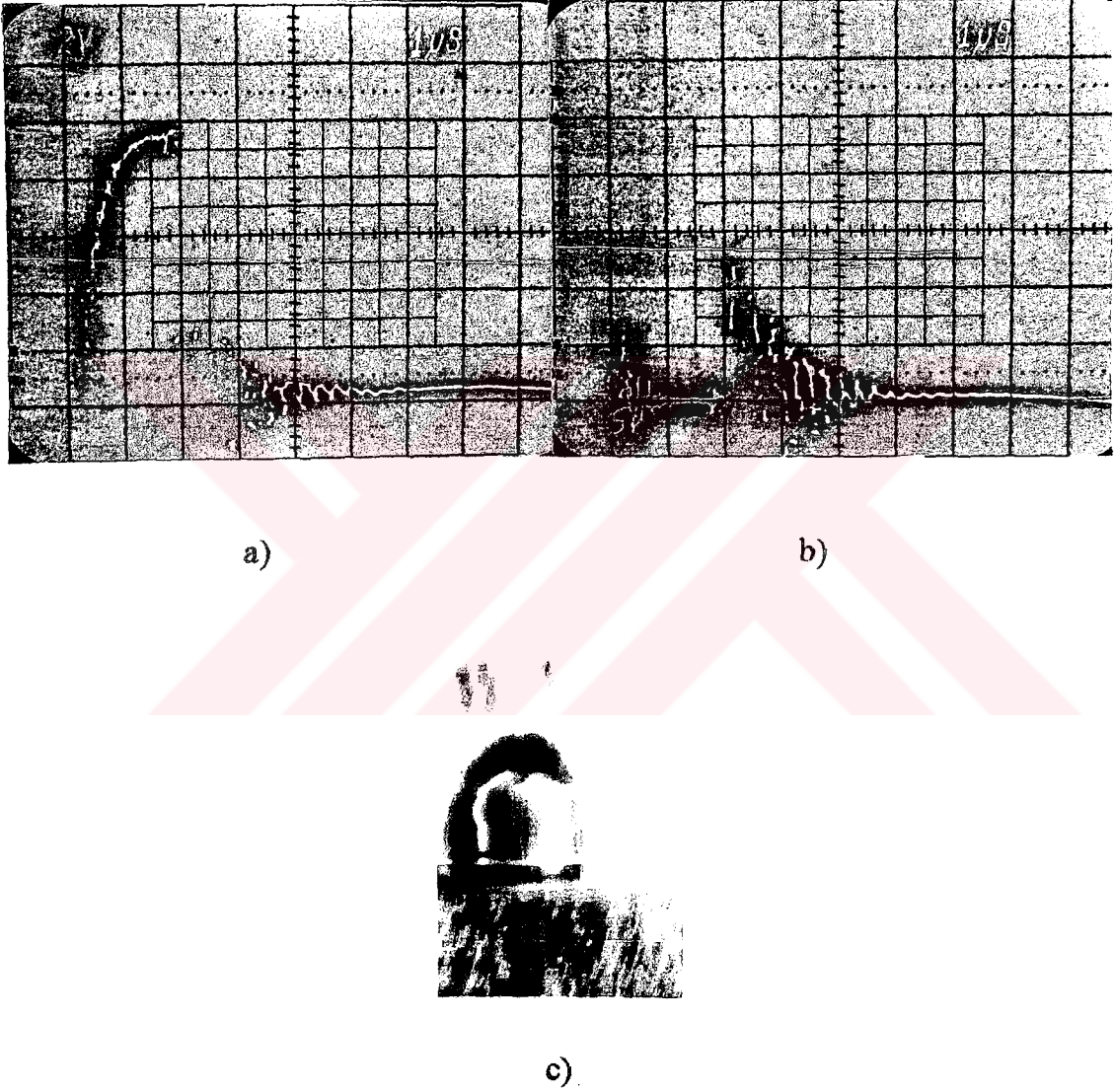
b)



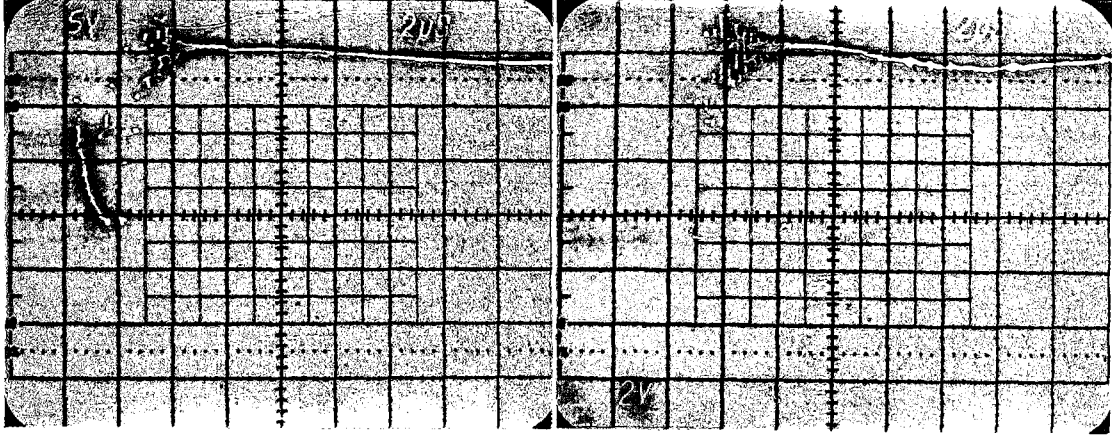
c)

Şekil 7.3. Havada, 0 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, negatif darbede ($a = 25$ mm)
 a) Darbe gerilimi osilogramı,
 b) Akım osilogramı,
 c) Boşalma fotoğrafı.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 25 mm elektrot açıklığında, 0 bar basınçlı SF_6 için elde edilen gerilim ve akım osilogramları ile boşalma fotoğrafları, pozitif ve negatif kutbiyetler için sırasıyla şekil 7.4 ve şekil 7.5'te; 1 bar basınçlı SF_6 için elde edilenler ise şekil 7.6 ve şekil 7.7'de ayrı ayrı gösterilmiştir.

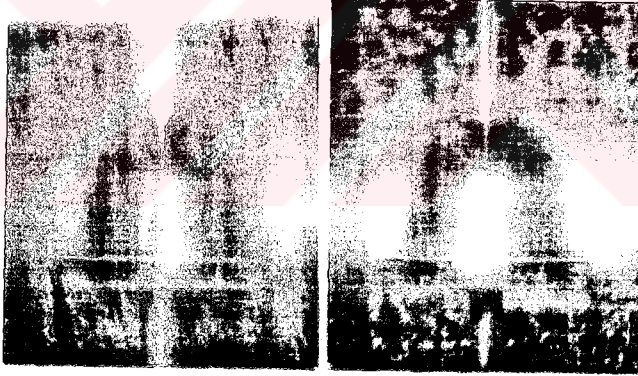


Şekil 7.4. SF_6 'da, 0 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, pozitif darbede ($a = 25$ mm),
a) Darbe gerilimi osilogramı,
b) Akım osilogramı,
c) Boşalma fotoğrafı.



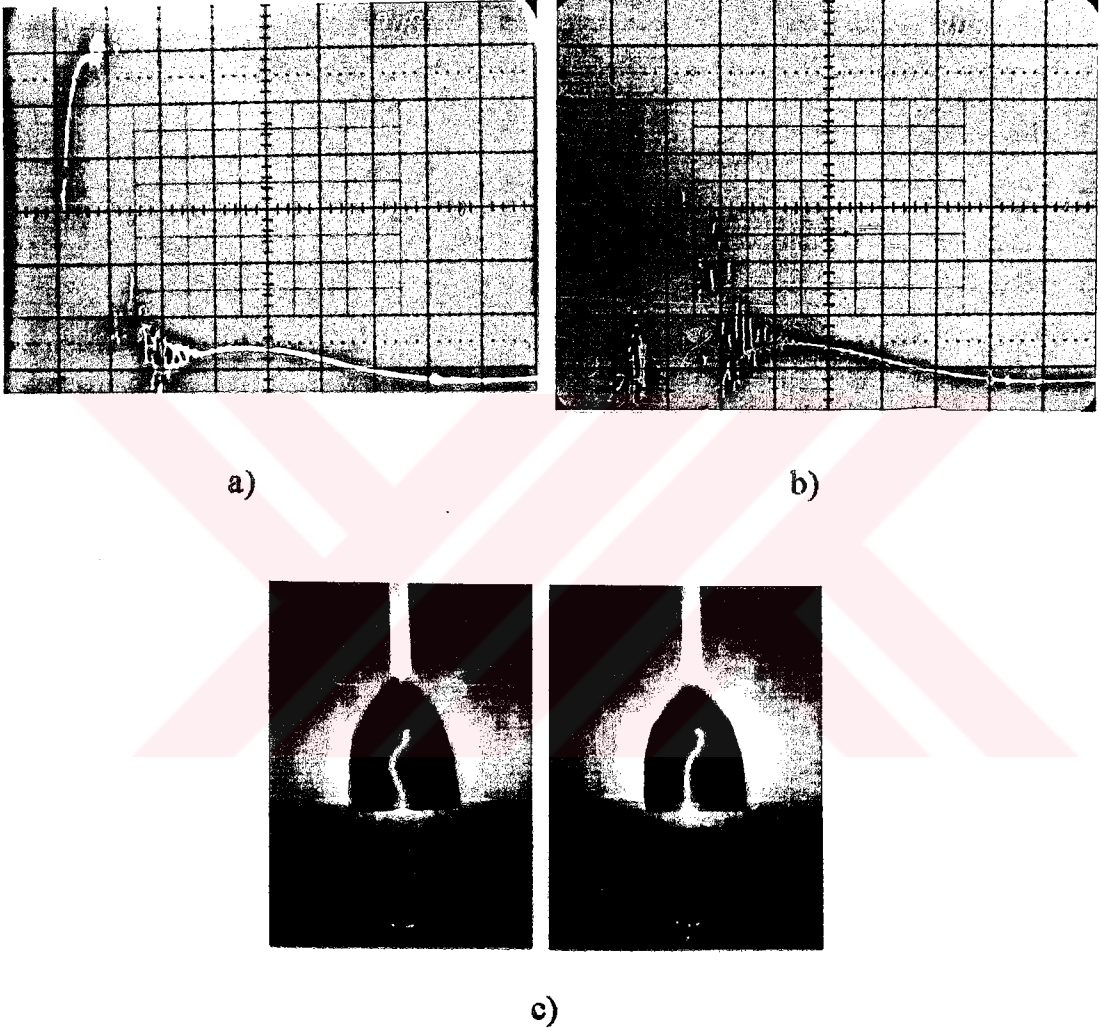
a)

b)

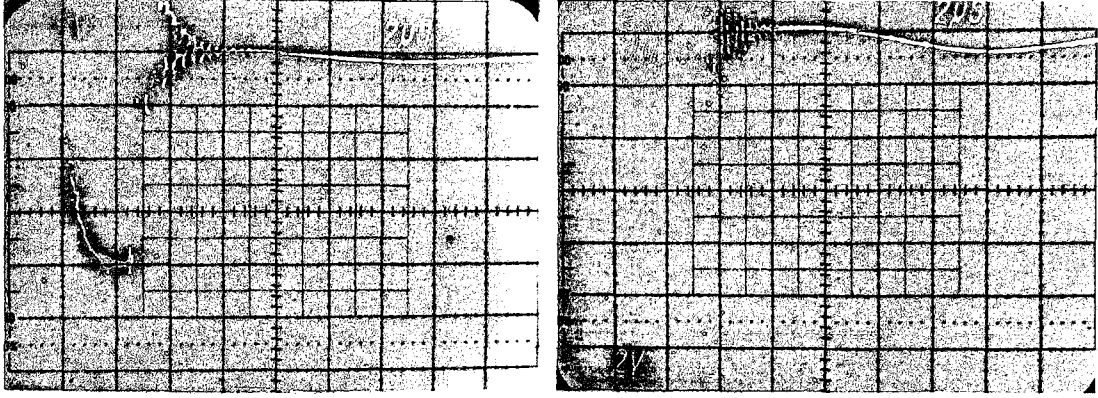


c)

Şekil 7.5. SF_6 'da, 0 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, negatif darbede ($a = 25 \text{ mm}$),
 a) Darbe gerilimi osilogramı,
 b) Akım osilogramı,
 c) Boşalma fotoğrafları.



**Şekil 7.6. SF₆'da, 1 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, pozitif darbeye ($a = 25$ mm),
 a) Darbe gerilimi osilogramı,
 b) Akım osilogramı,
 c) Boşalma fotoğrafları.**



a)

b)



c)

Şekil 7.7. SF_6 'da, 1 bar basınçta, küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, negatif darbede ($a = 25 \text{ mm}$),
 a) Darbe gerilimi osilogramı,
 b) Akım osilogramı,
 c) Boşalma fotoğrafları.

7.2. Osilogramların ve Boşalma Fotoğraflarının İrdelenmesi

Önceki alt bölümde verilen gerilim, akım osilogramları ve boşalma fotoğrafları, yaklaşık %50 atlama geriliminde alınmıştır. Bu osilogramlara göre boşalma olayının, gerek pozitif gerekse negatif kutbiyette standart darbe geriliminin sırtında tepe değerine yakın ortaya çıktığı söylenebilir.

Belirlenen boşalma süreleri, osilogram ve fotoğrafların alındığı basınç (0 bar-1 bar) bölgesinde, Al-Arainy ve diğerlerinin [17], Knorr [57], Lau ve Schultz'un [58], Schei ve diğerlerinin [59] boşalma sürelerine ilişkin çalışma sonuçları ile uyumludur. Ancak, gerilimin tepe değeri, %50 atlama geriliminin üzerine çıkarıldığında, Li ve arkadaşlarınca [6] da belirtildiği gibi boşalma süresi kısalır ve gerilim tepe değeri daha da yükseltilirse boşalma olayı, darbenin cephesinde ortaya çıkar.

Çekilen boşalma fotoğrafları incelendiğinde, negatif kutbiyetteki boşalmaların, pozitif kutbiyettekine göre; literatürde [18, 60-64] belirtildiği gibi daha parlak oldukları görülmektedir.

Boşalmanın, elektrot açıklığının en küçük olduğu bölgede, düz bir yol izlemesi beklenirken; zayıf bir elektronegatif gaz olarak nitelenebilecek olan hava için 0 bar basınçta pozitif darbe geriliminde boşalma, kıvrımlı ve çatalı bir yol izleyebilmekte; negatif darbeye ise boşalma izi, Watson ve arkadaşlarının çalışmalarına [65] benzer biçimde daha düz olmaktadır. Kuvvetli bir elektronegatif gaz olan SF_6 'da ise pozitif darbeye boşalma 0 bar basınçta küresel elektrodun yan yüzeyinde başlayıp, eğrisel bir yol izleyerek düzlem elektrodun pürüzü dışında son bulmaktadır. Basınç 1 bar'a çıkarıldığında ise boşalma yine küresel elektrodun yan yüzeyinde başlayıp, kıvrımlı ve daha ince bir yol izleyerek, düzlem elektrot üzerindeki pürüze ulaşmaktadır.

SF_6 'da, negatif darbe geriliminde ise boşalma, iki farklı noktadan gelişerek, düzlem üzerinde pürüz dışındaki noktalarda son bulabilmektedir. Negatif kutbiyetli darbe geriliminde boşalma izleri, pozitiftekilere göre daha parlak olmaktadır.

Boşalmanın başladığı ve son bulduğu noktaların, elektrot sisteminde beklenen atlama noktalarının dışında olması ve boşalmanın kıvrımlı bir yol izlemesi, boşalmanın kararlılığını ve delinme gerilimlerini etkilemektedir.

BÖLÜM 8

DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazları için Bölüm 5'te verilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi, aralarında ve literatürle karşılaştırılması yapılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılmasında sırasıyla küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, darbe delinme gerilimlerinin önce sabit basınçta elektrot açıklığı ile sonra sabit elektrot açıklığında basınçla değişimleri ele alınmıştır. Farklı gaz ve gaz karışımları arasındaki karşılaştırmaların yapılmasında Bölüm 6'da verilen eğrilerden ve literatür içeriğinden yararlanılmıştır. Karşılaştırmalar, deney sonuçlarının yorumlanmasını ve değerlendirmesini kolaylaştırmış, boşalma olaylarının parametrelerine bağlılığını görme olanağını vermiştir.

8.1. Havada $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Küre-düzlem elektrot sisteminde havanın pozitif darbe delinme gerilimi, elektrot açıklığı ile yaklaşık olarak doğrusal biçimde yükselmekte ve açıklık büyüdükçe yükselme hızı biraz artmaktadır. Aynı düzende havanın negatif darbe delinme gerilimi, küçük açıklıklarda pozitiftekine yaklaşık eşitken; elektrot açıklığı büyüdükçe pozitiftekine göre artmakta, ancak 1,5 bar ve üzerindeki basınçlarda, bu artış biraz yavaşlamaktadır.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde havanın pozitif darbe delinme gerilimi, 5 mm elektrot açıklığında tüm basınçlarda, küre-düzlemdekine göre 5-15 kV kadar daha büyük olmakta, açıklık ve basınç arttıkça aradaki fark azalmaktadır (şekil 5.1, 5.2). Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0 ve 0,5 bar dışındaki basınçlarda, 5 mm elektrot açıklığında, negatif delinme gerilimi, pozitiftekine göre yaklaşık 20 kV daha küçük olmaktadır. Açıklık büyüdükçe negatif delinme gerilimi pozitiftekine göre bir artış göstermekte; ancak, 2 bar ve üstündeki basınçlarda artış biraz yavaşlamaktadır.

Küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, negatif darbe geriliminde, 15, 20 ve 25 mm elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin basınçla değişimine ilişkin eğriler (şekil 5.30 ve 5.32), Safar ve arkadaşlarınca, 0,8 mm eğrilik yarıçaplı çubuk-düzlemde 50 mm elektrot açıklığı için verilen delinme gerilimi eğrisi [18] ile uyum içindedir. Her iki elektrot düzeninde, 0 bar basınçta, negatif darbe delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi, Shimazaki'nin çubuk-halka elektrot sisteminde elde ettiği sonuçlara [66] yaklaşık eşittir.

Deneysel olarak belirlenen delinme gerilimleri ve tablo 3-1 yardımıyla hesaplanan maksimum alan şiddetleri, düzgün alanda pürüzlü elektrot sistemi için Berger tarafından [67] ve çubuk-düzlem elektrot sistemleri için Pedersen tarafından [68] verilen alan şiddetlerinden, beklendiği gibi büyük olmaktadır.

8.2. N_2 'de $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemi durumunda N_2 'nin pozitif delinme gerilimleri, tüm basınç ve açıklıklarda; negatif darbe gerilimleri ise küçük açıklık ve basınçlarda, küre-düzlem sistemi durumundakine göre daha büyük olmaktadır. Açıklık ve basınç büyüdükçe pürüzün etkisi hemen hemen kalmamaktadır. Azot için elde edilen $U_a=f(b)$ eğrilerine bakıldığında küre-düzlem elektrot sisteminde büyük açıklıklarda basınç büyüdükçe eğrilerin değişiminde az da olsa doyma görülürken, aynı durumdaki küre-pürüzlü düzlem sisteminde yükselme gözlenmektedir.

Küre-düzlem elektrot sisteminde, negatif darbe geriliminde, 20 ve 25 mm elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin basınçla değişimine ilişkin eğriler (şekil 5.34), 0,8 mm eğrilik yarıçaplı çubuk-düzlemde 50 mm elektrot açıklığı için Safar ve arkadaşlarınca [18] verilen delinme gerilimi eğrisi ile uyumludur. Eğri, bu açıklıklarda basınç artıkça doyma eğilimi gösterirken; daha küçük açıklıklarda, basınçla daha yavaş artmakta ve bu artış, basınç yükseldikçe büyümektedir. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde ise bu durum, ele alınan tüm açıklıklar için söz konusu olmaktadır (şekil 5.36).

Pozitif darbe gerilimlerinin basınçla değişimi, Medeiros ve Naidu'nun çalışmalarına [69] benzemekle birlikte; düşük basınçlarda daha büyük ve basınç büyüdükçe daha küçük bir eğim izlemektedirler. Negatif darbe

gerilimleri ise söz konusu çalışma sonuçlarına göre basınçla daha hızlı bir artış göstermektedir. Pozitif darbede 25 mm elektrot açıklığında elde edilen delinme gerilimi, 0 bar basınçta, 30 mm elektrot açıklığındaki 0,4 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sistemi için Voss tarafından verilen değerle [70] uyumludur.

Pozitif darbe geriliminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında elde edilen delinme gerilimi eğrileri, Yializis ve arkadaşlarınca [71], aynı elektrot açıklığı ve basınç aralığında 6,3 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sistemi için verilen eğri ile benzer karakterdedir. Aynı gerilimler, Kuffel ve Yializis'in, 0,8 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, 5, 10 ve 20 mm elektrot açıklığı için vermiş oldukları [72] delinme gerilimlerine yaklaşık eşittir. Negatif darbe geriliminde, 10 mm elektrot açıklığındaki sonuçlar da, araştırmacıların verdikleri sonuçlarla uyumludur.

8.3. SF_6 'da $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Küre-düzlem elektrot sisteminde SF_6 'nın negatif darbe delinme gerilimi, küçük açıklıklarda pozitiftekine göre çok küçük olmakla birlikte açıklık büyüdükçe, büyük bir hızla artarak pozitifteki değerleri aşmaktadır.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, küre-düzlem sistemindekinden, beklenenin tersine genel olarak biraz büyüktür. $U_a=f(b)$ eğrilerinde ise küçük basınçlarda pürüzlü durumda pozitif darbe delinme geriliminin, küre-düzlemdekine göre tüm açıklıklar için biraz büyük olduğu; basınç arttıkça, büyümenin azaldığı görülmektedir. Her iki düzende pozitif darbe delinme gerilimleri, basınç arttıkça hızla yükselmekte; negatif darbe delinme gerilimleri ise doyma göstermektedir.

Gerek küre-düzlem gerekse küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, negatif darbe geriliminde, ele alınan tüm elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin basınçla değişimine ilişkin eğriler (şekil 5.38 ve 5.40), Safar ve arkadaşlarınca, 0,8 mm eğrilik yarıçaplı çubuk-düzlemde 50 mm elektrot açıklığı için verilen [18] delinme gerilimi eğrileri ile büyük benzerlik göstermektedirler.

Pozitif darbeye elde edilen delinme gerilimleri, Kuffel ve Yializis'in 0,8 mm eğrilik yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, 5, 10 ve 20 mm elektrot açıklığı için vermiş oldukları [72] delinme gerilimlerine hemen hemen eşittir. Negatif darbe sonuçları da, bu araştırmacıların aynı elektrot sisteminde 10 mm elektrot açıklığı için verdikleri sonuçlarla uyumludur.

Pozitif ve negatif darbe gerilimlerinde, 10 mm elektrot açıklığında, 3 bar basınçta elde edilen delinme gerilimleri, Honda ve arkadaşlarınca, 3 mm eğrilik yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sistemine ilişkin olarak verilen gerilimlere [73] yaklaşık olarak eşittir.

8.4. SF_6+N_2 'de $U_a=f(a)$ ve $U_a=f(b)$ Eğrilerinin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, %20 SF_6 içeren SF_6+N_2 gaz karışımında, pozitif darbe delinme gerilimlerinin, hem $U_a=f(a)$ hem de $U_a=f(b)$ eğrilerinde küre-düzlem sistemindekilerden küçük; negatif darbe gerilimlerinin ise yaklaşık eşit oldukları görülmektedir.

Küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, %40 SF_6 içeren SF_6+N_2 gaz karışımlarının pozitif darbe delinme gerilimleri, birbirine yakın; 4 bar basınçta pürüzlü sistemin delinme gerilimi biraz daha büyük olmaktadır. Pürüzlü ve pürüzsüz sistemlerin negatif darbe delinme gerilimleri, 0-2 bar basınç aralığında yaklaşık olarak birbirine eşit, 3-4 bar basınç aralığında ise pürüzlü sistemde biraz daha yüksektir.

Küre-düzlem elektrot sisteminde, %60 SF_6 içeren gaz karışımında, pozitif darbe delinme gerilimi, küçük basınç ve açıklıklarda, pürüzlü durumdan biraz düşük olmakta; açıklık ve basınç büyüdükçe durum tersine dönmektedir. Pozitif darbe gerilimleri için verilen $U_a=f(b)$ eğrileri, her iki elektrot sisteminde basınçla yükselme eğiliminde iken, negatif darbe geriliminde 4 bar basınçta doymaya ulaşmaktadırlar. Negatif darbe delinme geriliminde ise pürüz, etkisiz görünmektedir.

Küre-pürüzlü düzlem sisteminde, %80 SF_6 içeren karışımın pozitif darbe delinme gerilimi, 0 bar üzerindeki basınçlarda küre-düzlemdekine göre biraz daha yüksektir. Küre-pürüzlü düzlemde negatif darbe delinme gerilimi ise büyük açıklıklarda 2-4 bar basınç aralığında pürüzsüz sistemdekine eşit

görünürken, 0 bar basınç ve 10-25 mm elektrot açıklıklarında düşmekte, 1 bar basınçta 15-25 mm elektrot açıklıklarında yükselmektedir. $U_a=f(b)$ eğrilerine göre, her iki elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri basınçla artma eğiliminde iken, negatif gerilimde basınç artışı ile doymaya ulaşmaktadır.

Pozitif darbeye 25 mm elektrot açıklığında elde edilen atlama gerilimi eğrileri, 0 bar basınçta, 30 mm elektrot açıklığındaki 0,4 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, %10-%100 SF_6 içeren SF_6+N_2 gaz karışımları için Voss tarafından verilen eğrilerle [70] uyumludur.

Negatif darbe geriliminde, 44,5/113 mm yarıçaplarındaki eş eksenli silindrsel elektrot sistemine [74,75] göre gerek delinme gerilimleri, gerekse E_{max}/b bakımından daha küçük değerler elde edilmiştir. Maksimum alan şiddetindeki bu farklılık, elektrot etkin yüzey alanlarının farklı olmasına, gerilimdeki farklılıklar ise yüzey alanlarının ve etkin elektrot açıklıklarının çok farklı olmasına bağlanabilir.

Pozitif darbeye elde edilen delinme gerilimleri, Kuffel ve Yializis'in [72] çalışmalarında, 0,8 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, 5, 10 ve 20 mm elektrot açıklığı için vermiş oldukları delinme gerilimlerine yaklaşık eşittir. Negatif darbe sonuçları da, bu araştırmacıların aynı elektrot sisteminde 10 mm elektrot açıklığı için verdikleri sonuçlarla uyumludur.

8.5. Gaz Karışımındaki SF_6 Oranına Bağlı Olarak Elde Edilen Eğrilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Küre-düzlem elektrot sisteminde 0 bar basınçta pozitif darbe delinme gerilimi, 10 mm elektrot açıklığında %20-%100 SF_6 içeren karışımlar için yaklaşık olarak aynı kalmakta; 15-25 mm elektrot açıklıklarında da %20 SF_6 ve %60 SF_6 içeren karışımlar aynı delinme gerilimine sahip olmaktadır. %80 SF_6 içeren karışımın 25 mm elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimi, saf SF_6 'dakinden yüksekken, diğer açıklıklarda hemen hemen eşit olmaktadır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde ise pozitif darbe delinme gerilimi, tüm elektrot açıklıklarda karışımındaki SF_6 oranı ile artmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde 5 mm açıklıkta negatif darbe delinme gerilimi gaz oranlarından pek etkilenmemekte, diğer açıklıklarda ise karışımındaki SF_6 oranı ile artarak %80 SF_6 içeren karışımında en yüksek değerine

ulaşmaktadır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde ise 5 mm elektrot açıklığında negatif delinme gerilimi, saf N_2 'de en yüksek değerde iken, 15-25 mm elektrot açıklıklarında karışımdaki SF_6 oranı ile artmaktadır.

Küre-düzlem sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi eğrileri, 1 bar basınçta %20-%40 SF_6 içeren karışımlarda 10-25 mm elektrot açıklıklarında yükselmekte, bunların dışında ise 0 bar basınçtakine benzemektedir. Küre-pürüzlü düzlem durumunda 1 bar basınçta, 0 bar basınçtakine göre yalnızca saf N_2 'ye ilişkin değerler yükselmektedir.

2-4 bar basınç aralığında pozitif ve negatif darbe delinme gerilimi eğrileri, gerek küre-düzlem gerekse küre-pürüzlü düzlemde, yapı olarak 1 bar basınçta elde edilenlere benzemekte ve basınçla yükselmektedirler. Ancak 25 mm elektrot açıklığında 3-4 bar basınçlarında negatif darbe delinme gerilimleri, saf N_2 'de aşırı bir artış göstermektedirler.

Küre-düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri, 5 mm sabit elektrot açıklığında saf N_2 için en düşük, saf SF_6 için en büyük değerlerini almakta; 2-4 bar basınç aralığında ise %20-%60 SF_6 içeren karışımlarda gaz oranlarından etkilenmemektedirler. Küre-pürüzlü düzlemde ise, pozitif delinme gerilimi, karışımdaki SF_6 oranı ile artmakta, 1 ve 2 bar basınçlarında N_2 'ye ilişkin değerler, %20 SF_6 içeren karışımdakinden yüksek olmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde negatif darbe delinme gerilimleri, 0 bar basınçta karışımdaki gaz oranlarından etkilenmezken, basınç yükseldikçe gazdaki SF_6 oranı ile artarak %80 SF_6 içeren karışımda en büyük değerlerine ulaşmakta ve saf SF_6 'da düşmektedir. 3 ve 4 bar gaz basınçlarında %20 SF_6 içeren karışımların delinme gerilimleri, SF_6 oranı daha büyük olan karışımlarda elde edilenlerle aynı olmaktadır. Küre-pürüzlü düzlemde ise, negatif darbe delinme gerilimleri 1-3 bar basınçlarında karışımdaki SF_6 oranı ile yükselerek, %80 SF_6 içeren karışımda en büyük değerlerine ulaşmakta ve saf SF_6 'da düşmekte, 4 bar basınçta ise %40 SF_6 içeren karışımda en yüksek değerlerini almaktadırlar.

Küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde pozitif ve negatif darbe delinme gerilimleri, 10, 15, 20 ve 25 mm elektrot açıklıklarında, biçimsel olarak 5 mm elektrot açıklığındakilere benzemekte ve açıklıkların

büyümesi ile yükselmektedirler. Ancak, küre-düzlem elektrot sisteminde N_2 gazına ilişkin negatif darbe delinme gerilimleri, 3 bar basınçta %40-%60 SF_6 içeren karışımlarındaki değerlere eşit olmakta, 4 bar basınçta ise saf SF_6 değerlerine yaklaşmaktadır.

8.6. Sabit Basınçta ve Sabit Açıklıkta Karşılaştırmalı Eğrilerin Değerlendirilmesi

Bu ve bundan sonraki alt bölümlerde karşılaştırmalı eğrilerin değerlendirilmesi gaz karışımları için yapılmıştır. Küre-düzlem elektrot sisteminde 0 bar basınçta %20 SF_6 içeren karışımın pozitif darbe delinme gerilimleri, tüm açıklıklarda, %40 SF_6 içeren karışımdakilerden biraz yüksektir. Aynı elektrot sisteminde %80 SF_6 içeren karışımın hem pozitif hem de negatif darbe delinme gerilimleri, saf SF_6 'dakilerden yüksek olmaktadır. Bunun yanında eğrilerin yükselme hızları, karışımdaki SF_6 oranının büyümesi ile artmaktadır.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri, karışımdaki SF_6 oranı ile artmaktadır. %40 SF_6 içeren karışımlara ilişkin değerler, pürüzsüz durumdakilere yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Aynı elektrot sisteminde N_2 'ye ilişkin negatif delinme gerilimleri, tüm elektrot açıklıklarında pürüzsüz durumdakine göre yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde %20 SF_6 içeren karışımın 1 bar basınçta pozitif darbe delinme gerilimleri, tüm elektrot açıklıklarında %40 SF_6 içeren karışımkinden; 20-25 mm elektrot açıklıklarında da %60 oranında SF_6 içeren karışımdakinden yüksektir. N_2 ve havada basınç büyüdükçe pozitif delinme gerilimleri yükselmektedir. Aynı elektrot sisteminde negatif darbe delinme gerilimleri tüm açıklıklarda, karışımdaki SF_6 oranının ve basıncın yükselmesi ile artmaktadır. 2 bar basınçta ise %20 SF_6 içeren karışımın pozitif darbe delinme gerilimleri, tüm elektrot açıklıklarında %40 SF_6 ve 5-15 mm elektrot açıklıklarında %60 SF_6 içeren karışımdakinden daha yüksektir. 3 bar basınçta da pozitif ve negatif darbe delinme gerilimlerine ilişkin eğriler, 2 bar basınçtakilere benzemekte ve eğimleri daha büyük olmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde 4 bar basınçta %20 SF_6 içeren karışımın pozitif darbe delinme gerilimi, 5-15 mm elektrot açıklıklarında %40 oranında SF_6 içeren karışımınki ile aynı; %60 SF_6 içeren karışım ise, 15-25 mm elektrot açıklıklarında %80 oranında SF_6 içeren karışımdakinden büyüktür.

Aynı elektrot sisteminde %20 SF₆ içeren karışımın negatif darbe delinme gerilimi, tüm elektrot açıklıklarında %40 SF₆ içeren karışımdakilerden büyük, 15-25 mm elektrot açıklıklarında ise %60 oranında SF₆ içeren karışımdakilere eşittir.

Küre-pürüzlü düzlemde havanın pozitif darbe delinme gerilimleri, tüm elektrot açıklıklarında %20 SF₆; 20-25 mm elektrot açıklıklarında %40 SF₆ ve 25 mm elektrot açıklığında %60 SF₆ içeren karışımlardakinden daha yüksektir. Aynı elektrot düzeninde tüm karışım oranlarında negatif darbe delinme gerilimleri, küre-düzlem durumundakilere göre biraz yüksektir.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri, karışımdaki SF₆ oranındaki yükselme ile artmakta, %80 SF₆ içeren karışımda ve saf SF₆'da, küre-düzlem durumundakine göre daha büyük; diğer oranlardaki karışımlarda ise daha küçük olmaktadır. Aynı elektrot düzeninde %20-60 oranlarında SF₆ içeren karışımlarda pürüz, negatif darbe delinme gerilimini etkilememekte, saf SF₆'da ise delinme gerilimini yükseltmektedir.

Küre-pürüzlü düzlem sisteminde %40 ve 60 SF₆ içeren karışımların ve saf SF₆'nın pozitif darbe delinme gerilimleri, pürüzsüz durumdaki ile aynı; %20 SF₆ içeren karışımınki pürüzsüz durumdakinden oldukça küçük; %80 oranında SF₆ içeren karışımda ise büyüktür. Bu basınçta pürüz, negatif darbe delinme gerilimi üzerinde etkisiz görünmektedir.

Havanın negatif darbe delinme gerilimi pürüz nedeniyle, küçük elektrot açıklıklarında düşerken, büyük açıklıklarda yükselmektedir. %20 SF₆ içeren karışımın negatif darbe delinme gerilimi, %80 oranında SF₆ içeren karışımdakine ulaşmakta, hatta 10-20 mm elektrot açıklıklarında daha yüksek olmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde 5 mm elektrot açıklığında %20 SF₆ içeren karışımın pozitif darbe delinme gerilimi, 4 bar basınçta %40 oranında SF₆ içeren karışımınkine eşit, düşük basınçlarda ise bundan daha yüksek olmaktadır. Ayrıca, SF₆ ve karışımlarının pozitif darbe delinme gerilimleri, basınçla doğrusal olarak artmaktadır. Aynı elektrot sisteminde negatif darbe delinme gerilimi ise, %20 SF₆ içeren karışımda basınçla doğrusal yükselmesini sürdürürken diğer karışımlara ilişkin eğriler 3-4 bar basınç aralığında doyma göstermektedir.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, diğer karışım oranlarında küre-düzlem sistemindekine göre biraz yükselirken, %20 SF₆ içeren karışımlarda yükselme çok daha büyük olmakta ve %60 SF₆ içeren karışıma ilişkin değerleri aşmaktadır. Küre-pürüzlü düzlemde negatif darbe delinme gerilimi eğrileri, küre-düzlem sistemindekine benzemekle birlikte, 2-3 bar basınç aralığında %60 ve %80 SF₆ içeren karışımların delinme gerilimleri, saf SF₆'dakinden büyük olmaktadır. N₂'nin negatif darbe delinme gerilimi 5 mm elektrot açıklığında basınçtan etkilenmemektedir.

Küre-düzlem elektrot sisteminin 10 mm'lik elektrot açıklığında pozitif darbe delinme gerilimleri, 5 mm elektrot açıklığındakine göre yükselmekte ve %20 SF₆ içeren karışıma ilişkin değerler, %40 oranında SF₆ içeren karışımdakinden büyük olmaktadır. Negatif darbe delinme gerilimleri ise, 5 mm elektrot açıklığındakilerine göre yükselmektedirler.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri, karışımdaki SF₆ oranı ve basınç arttıkça doğrusal olarak yükselmektedir. Negatif darbe delinme gerilimlerinde ise pürüz etkisiz görünmektedir.

Küre-düzlem elektrot sisteminde 15 mm elektrot açıklığında gerek pozitif gerekse negatif darbe delinme gerilimleri, aynı karakterde olmakla birlikte 10 mm elektrot açıklığındakilerden büyüktür. Ancak %20 oranında SF₆ içeren karışımın 0-3 bar basınç aralığında pozitif darbe delinme gerilimi %40 SF₆ içeren karışımdakinden de büyük olmaktadır.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde 15-20 mm elektrot açıklıklarında pozitif darbe delinme gerilimleri, 10 mm elektrot açıklığında olduğu gibi karışımdaki SF₆ oranı ve basınç arttıkça yükselmektedir. Negatif darbe geriliminde ise pürüz etkisiz görünmektedir.

Gaz karışımları için küre-düzlem elektrot sisteminin 20 mm elektrot açıklığındaki pozitif ve negatif darbe delinme gerilimi eğrileri, 5-15 mm elektrot açıklığındakilere benzemekte; ancak gerilim değerleri, açıklık büyüdükçe yükselmektedirler. Havanın pozitif darbe delinme gerilimi, 1-4 bar basınç aralığında %20 oranında SF₆ içeren karışımdakinden yüksek olmaktadır.

Küre-düzlem elektrot sisteminde 25 mm elektrot açıklığında pozitif düzlemdeki delinme gerilimi eğrileri de daha küçük açıklıklardakilere

benzemekle birlikte, gerilim değerleri daha yüksek olmaktadır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimleri, basınç ve SF_6 oranının artışı ile artmaktadır. Küre-düzlem elektrot sisteminde havanın negatif darbe delinme gerilimleri, 1-4 bar basınçları arasında, %40 SF_6 içeren gaz karışımındakinden daha yüksektir. Negatif darbe geriliminde, pürüz etkisiz gibi görünmektedir.

8.7 Deney Sonuçlarının Fiziksel Yorumu

Buraya kadar, deney sonuçları, eğrilere ve gözlemlere dayanarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde karakteristik olarak görülen bazı durumlara ilişkin fiziksel yorumlar yapılabilir. Örneğin, gaz basıncındaki artış ile genel olarak delinme gerilimindeki yükselmenin sebeplerinden birinin, çarpma suretiyle iyonizasyondaki azalma olduğu söylenebilir. Benzer şekilde örneğin, gazın elektronegatif karakterinin yalnız başına ve karışım durumunda kendini gösterdiği görülmektedir. Pürüzün varlığının etkisi elektrot sistemindeki elektrik alan dağılımını değiştirmesi yönünde beklenirken; gerek etkin elektrot açıklığının büyümesi gerekse bu bölgedeki elektrik alan şiddetindeki yükselme nedeniyle uzay yüklerinin oluşumuna katkıda bulunması, alandaki bozulmayı azaltıcı etkiler olarak ortaya çıkarlar. Bu durum, deneylerde de karşılaşıldığı gibi, beklenenin aksine pürüzün varlığının delinme gerilimini etkilememesi veya azaltmak yerine artırması şeklinde kendini göstermektedir. Bu olaya, boşalma yolunun, pürüzün bulunduğu bölgeden uzak bir bölgeye uzamasının yol açtığı, deneysel çalışma sırasında ve boşalma fotoğraflarında (Bölüm 7) da gözlemlendiği gibi, söylenebilir. Deney sonuçlarından ve teorik alan hesaplarından (tablo 3-1) da görüldüğü gibi, elektrot açıklığının büyük olduğu durumlarda küre elektrot, alan bakımından baskın olmakta, pürüzün varlığının ve boyutlarının alan dağılımına etkisi ihmal edilir boyutlara inmektedir. Kutbiyetin etkisi düzgün olmayan alanda kanal teorisine göre açıklanan kutbiyet etkisine genelde uymaktadır.

N_2 'nin elektriksel delinme dayanımı, düzgün olmayan alanlarda en azından düşük basınçlarda, literatürde [75] belirtildiği gibi, SF_6 'ya göre daha az duyarlıdır. Dolayısıyla SF_6+N_2 karışımları da yüzey pürüzlülüğüne ve iletken parçacıklara karşı delinme gerilimi bakımından saf SF_6 'ya göre daha az duyarlıdır [75,76].

Çalışılan elektrot açıklıkları ve basınç aralığında, delinme gerilimi basınç eğrilerinde, pozitif standart darbe geriliminde, 50 mm elektrot açıklığında çeşitli oranlardaki $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımları için [72], %0,1 oranında SF_6 içeren karışım için [71] ve pozitif açma-kapama darbe geriliminde, 300 mm elektrot açıklığı için [77] verilen negatif eğim görülmemiştir. Söz konusu negatif eğim, %5'ten daha az oranda SF_6 içeren karışımlarda boşalma başlangıcının, çubuk elektrodun yarı küresel ucunda değil; en kısa elektrot açıklığı dışındaki bir noktada oluşmasına [72] ve uzay yükü etkisine bağlanmıştır [71]. Dale ve Wooton da 38/125 mm yarıçaplarındaki eş eksenli sistemde, 0-12 bar basınç aralığında, alternatif gerilim ve açma-kapama darbesindekinin tersine; standart darbe geriliminde negatif eğime rastlamamışlardır [78].

$\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımları, yanıcı ve zehirli olmamaları, %50-%60 SF_6 içeren karışımların delinme gerilimlerinin, saf SF_6 'nın delinme geriliminin %85-90'ına ulaşabilmesi, düzgün olmayan alanlara, iletken parçacıklara ve elektrot yüzey pürüzlülüğüne daha az duyarlı olmaları nedeniyle çekici olmaktadır. Ayrıca, bu gaz karışımları, SF_6 yalıtımlı aygıtlarda basınç için üst sınır olan 6 bar basıncın üzerinde, sıvılaşma olmaksızın kullanılabilmekte ve gaz maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadırlar [77,79]. Benzer şekilde, Pedersen [76] ve Christophorou [75] tarafından $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımlarında, örneğin %50'şerlik bir karışım oranında, 5,4 bar basınç için verilen delinme dayanımının, 4,5 bar basıncındaki saf SF_6 'nın delinme dayanımına eşit olduğu, bu arada yoğunlaşma sıcaklığının düştüğü ve gaz maliyetinin %40 oranında azaldığı belirtilmektedir. Bu avantajlarından yararlanarak karışımların uygulamada kullanılabilmesi için farklı elektrot yüzey koşulları ve farklı elektriksel zorlanmalar altında, yüksek basınçlarda boşalma olayları üzerinde, sistematik daha pek çok çalışmaya gereksinim vardır.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gazlarda boşalma olaylarının değişik parametrelere bağlı olarak davranışlarının incelenmeye devam ettiği günümüzde bu çalışma ile katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu çalışmada hava, N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 gazlarında düzgün olmayan alanda, darbe geriliminde delinme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. İncelemelerde düzgün olmayan alan, küre-düzlem elektrot sistemi ile göz önüne alınmış, bu sistemde elektrot açıklığı, gazın basıncı, darbe geriliminin kutbiyeti, düzlem elektrot üzerinde pürüz varlığı ve gaz karışımlarındaki SF_6 oranı değişken olarak alınmıştır.

Çalışmada, elektrot açıklığı 5-25 mm, basınç 0-4 bar arasında değiştirilmiş; 1 mm yarıçaplı bir yarıküresel pürüz ile pürüzün var olması veya olmaması durumunda delinme olayları incelenmiştir. SF_6+N_2 gaz karışımında karışımdaki SF_6 oranı %20'lik basamaklar halinde arttırılarak, ortaya çıkan gaz karışımlarının, göz önüne alınan parametrelere bağlılığı gözlenmiştir.

Kuramsal alan incelemelerinin, boşalma olayları açıklamalarının da verildiği bu çalışmada özet olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Havada, küre-düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, elektrot açıklığının büyümesi ile doğrusal olarak artmakta; negatif darbe delinme gerilimi ise, küçük elektrot açıklıklarında pozitif darbeye eşit olmakta; elektrot açıklığı büyüdükçe, daha hızlı bir biçimde yükselmektedir. Küre-pürüzlü düzlem durumunda pozitif darbe delinme gerilimi, küre-düzlem durumundakine göre daha yüksek olmaktadır. Pürüzlü durumda negatif darbe delinme geriliminin, elektrot açıklığı ve basınç artışı ile yükselme hızı, küre-düzlemdekine göre düşmektedir.
- 2) N_2 'de küre-düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, elektrot açıklığı büyüdükçe yükselmekte, ancak yükselme miktarı,

küre-pürüzlü düzlemdekinden az olmaktadır. Aynı elektrot sisteminde elektrot açıklığının büyümesi ile negatif darbe delinme geriliminde ortaya çıkan yükselme havadakine göre büyük olmaktadır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, küre-düzlem durumundakine göre daha yüksek olmaktadır. Pürüzlü durumda negatif darbe delinme gerilimi ise, küçük açıklık ve basınçlarda yükselmekte, büyük açıklık ve basınçlarda pürüzsüz durumdakine eşit olmaktadır.

- 3) SF_6 'da küre-düzlem elektrot sisteminde negatif darbe delinme gerilimi, küçük elektrot açıklıklarında pozitiftekine göre, alışılmışın tersine, çok küçük olmakta, elektrot açıklığı büyüdükçe, hızla yükselerek pozitifteki değerleri aşmaktadır. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme gerilimi, yüksek basınç ve büyük elektrot açıklıklarında küre-düzlem elektrot sistemindekinden biraz büyük olmaktadır. Negatif darbe delinme gerilimi, pürüzden pek etkilenmemektedir.
- 4) %20 SF_6 + %80 N_2 karışımlarının küre-düzlem elektrot sisteminde gerek pozitif gerekse negatif darbe delinme gerilimleri, saf SF_6 'dakine göre küçüktür. Pürüzlü durumda ise, pozitif darbe delinme geriliminin, küre-düzlem durumundakine göre küçük; negatif darbe delinme geriliminin ise küre-düzlem durumundakinden yüksek olduğu görülmektedir. %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımında küre-düzlem elektrot sisteminde pozitif darbe delinme geriliminin, büyük basınçlarda, %20 SF_6 + %80 N_2 karışımındakine eşit, 0-1 bar basınçlarında ise daha küçük olduğu görülmektedir. Aynı karışımın negatif darbe delinme gerilimi, %20 SF_6 içeren karışımındakinden biraz küçük olmaktadır. Bu karışım oranlarında pozitif darbe delinme gerilimleri, pürüzden pek etkilenmemektedirler. Pürüzün, %60 SF_6 + %40 N_2 karışımında pozitif darbe delinme gerilimini etkilemediği, negatif darbe delinme gerilimlerini ise biraz düşürdüğü görülmektedir. %80 SF_6 + %20 N_2 karışımında pozitif darbe delinme gerilimi, küre-düzlemdekine göre biraz yüksektir. Küre-düzlem elektrot sisteminde negatif darbe delinme gerilimi büyük açıklıklarda 2-4 bar basınçlarında pürüzlü düzlemdekine eşit olmaktadır.
- 5) $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımları, basıncın bir miktar yükseltilmesi koşulu ile saf SF_6 'ın delinme gerilimlerine ulaşılabilirdiği, düzgün olmayan alanlara ve elektrot yüzey pürüzlülüğüne daha az duyarlı gaz yalıtkan karakteri göstermektedir. Ayrıca, $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ karışımlarının, yanıcı ve zehirli olmamaları, daha

yüksek basınçlarda sıvılaşıma olmaksızın kullanılabilmeleri ve SF_6 'ya göre daha ucuz olmaları bu karışımları, SF_6 'ya alternatif olarak ortaya çıkarmaktadır.

- 6) Genel olarak elektrot yüzey pürüzlülüğünün, delinme gerilimlerini düşürdüğü bilinir. Çalışmada kullanılan düzgün olmayan alan dağılımına sahip elektrot sistemlerinde ise, incelenen boyuttaki bir elektrot yüzey pürüzünün etkisiz olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada elektrot açıklığının, küre-düzlem arasındaki açıklık yerine küre-pürüz arasındaki açıklık olarak alınmasına bağlanabilir.
- 7) Çalışmanın deneysel ölçme bölümünde, U_a %50 atlama gerilimi, literatürde önerilen yöntemler geliştirilerek, en küçük kareler yöntemine göre birinci dereceden eğri uydurma yolu ile belirlenmiştir.

Yukarıda ana başlıklarla verilen sonuçlar, bu alandaki literatürde verilen deneysel çalışmaların sonuçları ile uyumlu, mevcut verilere katkıda bulunan ve genişleten bir çalışma olmuştur. Örneğin çalışmada, boşalma olaylarının incelenmesinde, basınç altında elektrot açıklığının değiştirilebildiği bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzenek sayesinde basınç altında sabit elektrot açıklığında çalışma sınırlaması ile aşırı gaz ve zaman kaybı gibi problemler aşılmış ve basınç altında elektrot açıklığını parametre alma olanağı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın, bu alandaki çalışmalar içinde bir kesit olduğu açıktır. Dolayısıyla bu çalışma, en azından, benzer gaz ve gaz karışımları davranışlarının araştırılması, 4 bar'dan daha yüksek basınçların incelenmesi, ortam sıcaklığı ve/veya gaz neminin parametre olarak ele alınması, elektrot sistemindeki pürüz boyutlarının, yerinin ve cinsinin etkilerinin araştırılması biçiminde sürdürülebilir. Ayrıca gaz saflığının, ortamdaki yabancı maddelerin (çözünmüş gaz, serbest parçacıklar, vb.) etkilerinin araştırılması, gerçek elektrot yapılarının ele alınması ve farklı cephe ve sırt yarı değer süreli darbe gerilimleri davranışlarının incelenmesi biçiminde genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] CHRISTOPHOROU, L.G. and PINNADUWAGE, L.A., Basic Physics Of Gaseous Dielectrics, IEEE Transactions On Electrical Insulation Vol. EI-25 No.1, pp.55-74, February 1990.
- [2] OSMOKROVIĆ, P., KRSTIĆ, S., LJEVAK, M. and NOVAKOVIĆ, D., Influence of GIS Parameters on the Tipler Constant, IEEE Tr. On Electrical Insul. Vol. EI-27, No.2, pp.214-20, April 1992.
- [3] NIEMEYER, L., CHU, F.Y., SF₆ and The Atmosphere, IEEE Tr. On Electr. Ins., Vol. EI-27, No.1, pp.184-87, February 1992.
- [4] NEMA, R.S., KULKARNI, S.V. and HUSAIN, E., On Calculation Of Break-down Voltages Of Mixtures Of Electron Attaching Gases, IEEE Trans. On Electrical Ins. Vol. EI-17, No.5, pp.434-40, Oct.1982.
- [5] BOBO, J.C., VIGREUX J., Dielectric Behavior Of Insulation In SF₆ At Extra High Voltage, Intern. Conf. on Large High Voltage Electrical Systems (CIGRE), Proceedings of The 26th Session 25 August-2 September 1976, Vol.1 (15-08)
- [6] LI, Z., KUFFEL, R. and KUFFEL, E., Volt-Time Characteristics In Air, SF₆/Air Mixture And N₂ For Coaxial Cylinder And Rod-Sphere Gaps, IEEE Trans. On Electr. Insul. Vol.EI-21, No.2, pp.151-55, April 1986.
- [7] BRUNT, R.J.van and HERRON, J.T., Fundamental Processes Of SF₆ Decomposition And Oxidation In Glow And Corona Discharges, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol.25, No.1, pp.75-94, Febr. 1990.
- [8] GOVINDA RAJU, G.R. and DINCER, M.S., Measurement Of Ionization And Attachment Coefficients In SF₆ And SF₆+N₂, J.Appl.Phys. 53(12), pp.8562-67, December 1982.
- [9] DINCER, M.S. and GOVINDA RAJU, G.R., Ionization And Attachment Coefficients In SF₆+N₂ Mixtures, IEEE Trans. on Electrical Insu. Vol.EI-19 No.1, pp.40-44, February 1984.

- [10] MALIK, N.H., QURESHI, A.H. and THEOPHILUS, G.D., Static Field Breakdown Of SF₆ -N₂ Mixtures In Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. on Electr.Insul, Vol EI-14 No 2, pp.61-69, April 1979.
- [11] ITAKA, K., IKEDA, G., Dielectric Characteristics Of Compressed Gas Insulated Cables, IEEE Trans. On Power Apparatus And Sys., Vol. PAS-89, No.8, pp.1986-95, November-December 1970.
- [12] TAKUMA, T., Discharge Characteristics Of Gaseous Dielectrics, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol. EI-21, No.6, pp.855-67, Dec.1986.
- [13] SUZUKI, K., SAITO, S. and YOSHIDA, S., Power Cable Insulation, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol.EI-21, No.6, pp.945-52, Dec.1986.
- [14] McALLISTER, I.W., On The Concept Of Electrode Surface Roughnes With Reference To Discharge Phenomena In Strongly Electronegative Gases, IEEE Tr.On Electr. Ins., Vol.EI-21, No.4, pp.659-61, August 1986.
- [15] McALLISTER, I.W., CRICHTON, G.C., An Experimental Method to Determine the Electrostatic Field Enhancement Factor of a Practical Conductor Surface, IEEE Tr. On Electr. Ins., Vol.EI-24, No.2, pp.325-43, Apr.1989.
- [16] MAZUREK, B., CROSS, J.D., HEESWIJK, R.G., The Effect of a Metallic Particle near a Spacer on Flashover Phenomena in SF₆, IEEE Tr. On Electr.Ins., Vol. EI-28, No.2, pp.219-29, April 1993.
- [17] AL-ARAINY, A.A., MALIK, N.H., QURESHI, M.I., Influence of Sand/-Dust Contamination on the Breakdown of Asymmetrical Air Gaps under Lightning Impulses, IEEE Tr. On Electr.Ins., Vol. EI-27, No.2, pp.193-206, April 1992.
- [18] SAFAR, Y.A., MALIK, N.H. and QURESHI, A.H., Impulse Breakdown Behavior Of Negative Rod-Plane Gaps in SF₆-N₂, SF₆-Air and SF₆-CO₂ Mixtures, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol.EI-17, No.1, pp.441-49, October 1982.
- [19] SAUERS, I., ELLIS, H.W. and CHRISTOPHOROU, L.G., Neutral Decomposition In Spark Breakdown Of SF₆, IEEE Trans. On Electrical Insulation Vol.EI-21, No.2, pp.111-20, April 1986.
- [20] ÖZKAYA, M., Yüksek Gerilim Tekniğinde Desarj Olayları, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı:1152, İstanbul, 1979.

- [21] KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., High Voltage Engineering-Fundamentals, Pergamon Press, 1984.
- [22] ALSTON L.L., High Voltage Technology, Oxford University Press, 1968.
- [23] ÖZKAYA, M., Yüksek Gerilim Tekniği I, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fak. Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul, 1988.
- [24] LOEB, L.B., MEEK, J.M., The Mechanism Of The Electric Spark, Stanford University Press, California, 1941.
- [25] TOWNSEND, J., Electrons In Gases, Hutchinson's Scientific and Technical Publications, London, 1947.
- [26] PAPOULAR, R., Electrial Phenomena in Gases, Iliffe Books Ltd, London, 1965.
- [27] GÖNENÇ, İ., Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 1 Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrot Sistemleri, Matbaa Teknisyenleri Koll. Şti., İstanbul, 1977.
- [28] JIN, J., The Finite Element Method in Electromagnetic, Wiley, N.York, 1993.
- [29] SILVESTER, P.P., FERRARI, R.L., Finite Elements for Electrical Engineers, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1983.
- [30] MATTHEW, N.O.S., A Simple Introduction To Finite Element Analysis Of Electromagnetic Problems, IEEE Trans.On Education, Vol.32, No.2, pp.85-93, May 1989.
- [31] OKUBO, H., IKEDA, M., HONDA, M., YANARI, T., Electric Field Analysis By Combination Method, IEEE Trans. On Power Apparatus And Systems Vol.PAS-101, No.10, pp.4039-46, Oct.1982.
- [32] XIANG, C., LI, C., A Finite Element Algorithm of Plotting Electric Force Line in Two-Dimensional Electrostatic Field Computation, IEEE Trans.on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1789-92, March 1992.
- [33] BEATOVIC, D., LEVIN, P.L., SADOVIC, S., HUTNAK, R., A Galerkin Formulation of the Boundary Element Method for Two-dimensional and Axi-symmetric Problems in Electrostatics, IEEE Tr. On Elc.Ins., Vol. EI-27, No.1, pp.135-43, February 1992.

- [34] OKUBO, H., HONDA, M., MENJU, S., Calculation Error And The Field Discretisation Of Finite Element Method, Third Intern. Symp. On High Voltage Engineering, Milan, (11.05), 28-31 August 1979.
- [35] ANDERSEN, O.W., Laplacian Electrostatic Field Calculations By Finite Elements With Automatic Grid Generation, IEEE Trans. On Power App. And Syst. Vol.PAS-92, pp.1486-92, Sep/Oct.1973.
- [36] JANISCHEWSKI, W., GELA, G., Finite Element Solution For Electric Fields Of Coronating DC Transmission Lines, IEEE Tr. On Power App. And Syst. Vol.PAS-98, No.3, pp.1000-12, May/June 1979.
- [37] NEMA, R.S., KULKARNI, S.V. and HUSAIN, E., Calculation Of Sparking Potentials Of SF₆ And SF₆-Gas Mixtures In Uniform And Nonuniform Electric Fields, IEEE Tr. On Electr. Ins. Vol.E-17, No.1, pp.70-75, Feb.1982.
- [38] KOUNO, T., Computer Calculation Of Electrical Fields, IEEE Tr. On Electr. Ins. Vol. EI-21, No.6, pp.869-72, Dec.1986.
- [39] SCHWAIGER, A., Elektrische Festigkeitslehre, Julius Springer, Berlin, 1925.
- [40] PRINZ, H., Hochspannungsfelder, Oldenburg, München, 1969.
- [41] KIND, D., KARNER, H., High-Voltage Insulation Technology-Textbook for Electrical Engineers, Friedr. Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 1985.
- [42] KHALED, M., New Method for Computing the Inception Voltage of a Positive Rod-Plane Gap in Atmospheric Air, ETZ-A, Bd. 95, pp.369-73, 1974.
- [43] BOUWERS, A., Elektrische Höchstspannungen, Julius Springer, Berlin, 1939.
- [44] MASETTI, C., PARMIGIANI, B., Arrea Effect on the Electrical Break-down of Compressed SF₆ Insulated Systems, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 32.15, Milan, 28-31, August 1979.
- [45] NITTA, T., FUJIWARA, Y., ENDO, F., OZAWA, J., Effects of Electrode And Solid Insulator On The Flashover In Compressed SF₆, Int. Conf. on Large High Voltage Electrical Systems (CIGRE), Proceedings of The 26th Session 25 August-2 September 1976, Vol.1 (15-04).

- [46] BRADWEL, A., Electrical Insulation, Peter Peregrinus Ltd., London, 1983.
- [47] NAIDU, M.S., KAMARAJU, V., High Voltage Engineering, McGraw-Hill Publishing, Tata McGraw-Hill Publishing C. Ltd., New Delhi, 1989.
- [48] KUFFEL, E., ABDULLAH, M., High-voltage Engineering, Pergamon Press, 1970.
- [49] HAUSCHILD, W., MOSCH, W., Statistical Techniques for High-Voltage Engineering, Peter Peregrinus Ltd., London, 1992.
- [50] GOUDA, O.E., ZEITOUN, A.G., EISAWY, E.A., New Algorithm for Determining Critical Flashover Voltage and Standard Deviation from Flashover Probability Data, ETEP Vol.1, No.5, Sept./Oct. 1991.
- [51] GALLAGHER, T. J., PEARMAIN, A. J., High Voltage-Measurement, Testing and Design, John Wiley & Sons, 1983.
- [52] KIND, D., High-Voltage Experimental Technique-Textbook for Electrical Engineers, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden, 1978.
- [53] LOOMS, J.S.T., Insulators for High Voltages, Peter Peregrinus Ltd., London, 1988.
- [54] RYAN, H.M., WATSON W.L., et.al., Factors Affecting The Insulation Strength Of SF₆ Filled Systems, International Conference on Large High Voltage Electrical Systems (CIGRE), Proceedings of The 26th Session 25 August-2 September 1976, Vol.1 (15-02).
- [55] VIBHOLM, S., THREGOD, P., The Analysis Of Insulation Probabilities By The Up-And-Down Method, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol. EI-21, No.2, pp.133-36, April 1986.
- [56] SUZUKI, T., The Determination Of The Diffusion Rate Of SF₆ Into Nitrogen, IEEE Tr. On Electr. Ins. Vol. EI-17, No.1, pp.34-38 Feb.1982.
- [57] KNORR, W., A Model To Describe The Ignition Time-Lag Of Slightly Nonuniform Arrangements In SF₆, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 31.11, Milan, 28-31 August 1979.
- [58] LAU, H., SCHULTZ, H., Times To Breakdown In SF₆ At High Pressures, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 32.02, Milan, 28-31 August 1979.

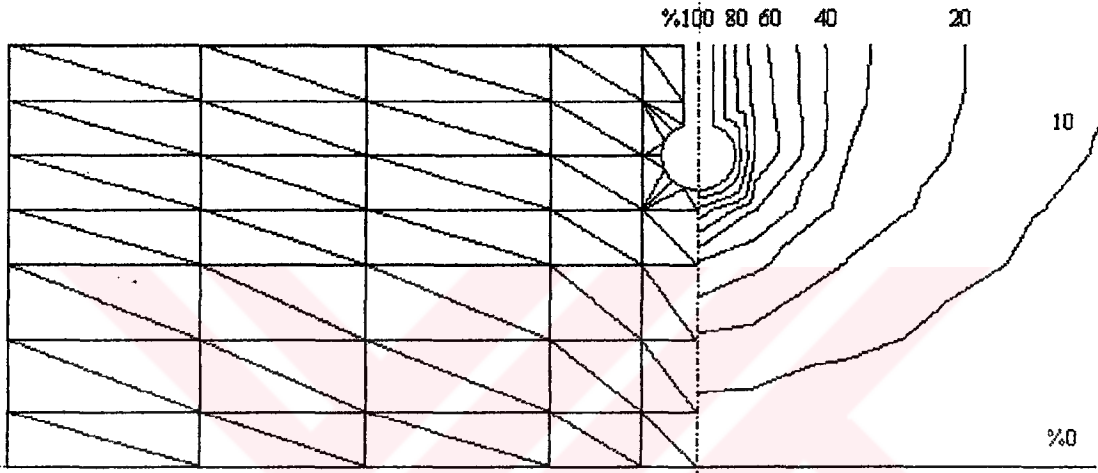
- [59] SCHEL, A., HENRIKSEN, T. and REIN, A., Withstand Characteristics and Breakdown Criteria of SF₆, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 32.12, Milan, 28-31 August 1979.
- [60] NIEMEYER, L., ULLRICH, L., WIEGART, N., The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegatif Gases, IEEE Tr. On Electr. Ins. Vol. EI-24, No.2, pp.309-24 April 1989.
- [61] DREGER, G., The Influence of The Rate of Primary Electrons on The Delay of Firing at Breakdown of Impulse Voltage in SF₆ at Uniform and Inhomogeneous Fields, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 31.06, Milan, 28-31 August 1979.
- [62] BORTNIK, I.M. and VERTIKOV, V.P., Discharge Development in SF₆, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 32.11, Milan, 28-31 August 1979.
- [63] WIEGART, N., NIEMEYER, L., NIEMEYER, L., PINNECAMP, F., et.al., Inhomogeneous Field Breakdown In GIS-The Prediction Of Breakdown Probabilities And Voltages, Part II: Ion Density and Statistical Time Lag, IEEE Tr. on Power Delivery, Vol.3, pp.931-38, July 1988.
- [64] ABDEL-SALAM, M., WEISS, P. and LIESKE, B., Discharges in Air from Point Electrodes in the Presence of Dielectric Plates: Experimental Results, IEEE Trans. On Electr. Ins. Vol. EI-27, No.2, pp.309-19, April 1992.
- [65] WATSON, D.B., KHO, S.K., SAMUELS, K.A., MA, L., CHIU, J.B., Impulse Flashover Trajectory in Air in Nonuniform Fields, IEEE Tr. On Electr. Ins., Vol. EI-28, No.2, pp.201-8, April 1993.
- [66] SHIMAZAKI, T., Flashover Characteristics and Surface Processes under Negative Impulse Voltage in Atmospheric Air, IEEE Tr. On Electr.Insul., Vol.27, No.3, pp.488-95, June 1992.
- [67] BERGER, S., Onset Or Breakdown Voltage Reduction By Electrode Surface Roughness In Air And SF₆, IEEE Trans.on Power App. and Syst., Vol.PAS-95, No.4, pp.1073-79, July/August 1976.
- [68] PEDERSEN, A., On The Electrical Breakdown Of Gaseous Dielectrics, IEEE Tr. On Electr.Ins., Vol.EI-24, No.5, pp.721-39, Oct. 1989.

- [69] MEDEIROS, P.T. and NAIDU, S.R., Positive and Negative Lightning Impulse Breakdown of Rod-Plane Gaps in Nitrogen, Conf. on Electr. Ins. and Dielectric Phenomena, 83CH1902-6, pp.48-53, Oct. 16-20 1983, Buck Hill Inn/Buck Hill Falls, PA.
- [70] VOß, W.: Discharge Development of Non-Uniform Gaps in SF₆-N₂ Gas Mixtures, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 31.13, Milan, 28-31 August 1979.]
- [71] YIALIZIS, A., MALIK, N.H., QURESHI, A.H. and KUFFEL E., Impulse Breakdown and Corona Characteristics for Rod-Plane Gaps in Mixtures of SF₆ and Nitrogen with Less Than 1% of SF₆ Content, IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.5, pp.1832-39, Sept//Oct 1979.
- [72] KUFFEL, E., YIALIZIS, A., Impulse Breakdown of Positive and Negative Rod-Plane Gaps in SF₆-N₂ Mixtures, IEEE Trans.on Power App. and Syst., Vol.PAS-97, No.6, pp.2359-66, Nov/ec 1978.
- [73] HONDA, M., OKUBO, H., AOYAGI, H., INUI, A., Impulse Breakdown Characteristics of Coated Electrodes in SF₆ Gas, IEEE, Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-2, No.3, pp.699-708, July 1987.
- [74] COOKSON, A.H. and PEDERSEN B.O., Analysis of The High Voltage Breakdown Results for Mixtures of SF₆ with CO₂, N₂ and Air, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 31.10, Milan, 28-31 August 1979.
- [75] CHRISTOPHOROU, L.G. and VAN BRUNT, R.J., SF₆/N₂ Mixtures-Basic and HV Insulation Properties, IEEE Tr. On Diel. and Elc. Ins., Vol.2, No.5, pp.952-1003, October 1995.
- [76] PEDERSEN, A., The Effect of Surface Roughness On Breakdown in SF₆, IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-94, No.5, pp.1749-53, September/October 1975.
- [77] MALIK, N.H. and QURESHI, A Review of Electrical Breakdown in Mixtures of SF₆ and Other Gases-Plane Gaps, IEEE Trans. on Electr. Insul, Vol EI-14 No 2, pp.61-69, April 1979.
- [78] DALE, S.J. and WOOTTON, R.E., Effect of Fixed Particle Protrusions on 60 Hz and Impulse Breakdown Voltage-Pressure Characteristics in SF₆, Third Int. Symp. On High Voltage Engineering, 32.10, Milan, 28-31 August 1979.

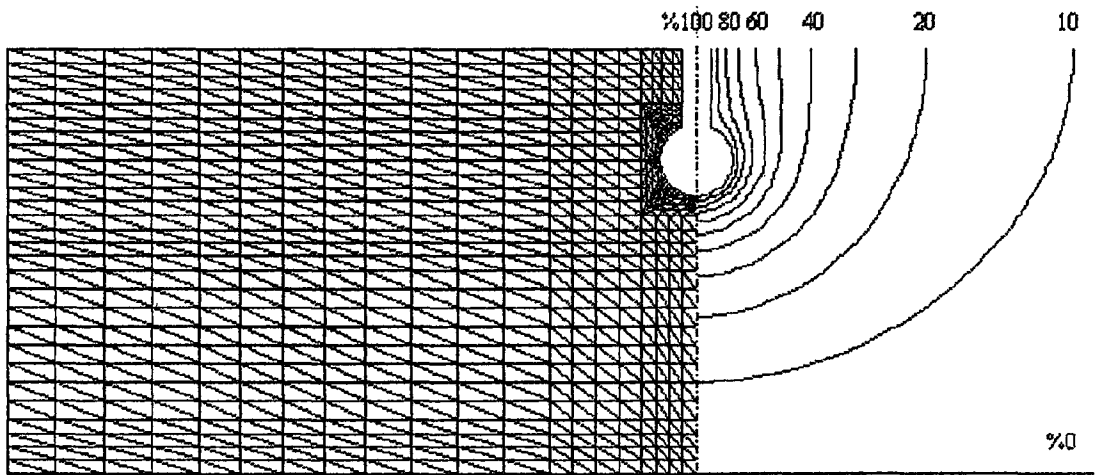
- [79] MALIK, N.H. and QURESHI, Calculation of Discharge Inception Voltages in $\text{SF}_6\text{-N}_2$ Mixtures, IEEE Trans. on Electr. Insul, Vol EI-14 No 2, pp.70-76, April 1979.

EKLER

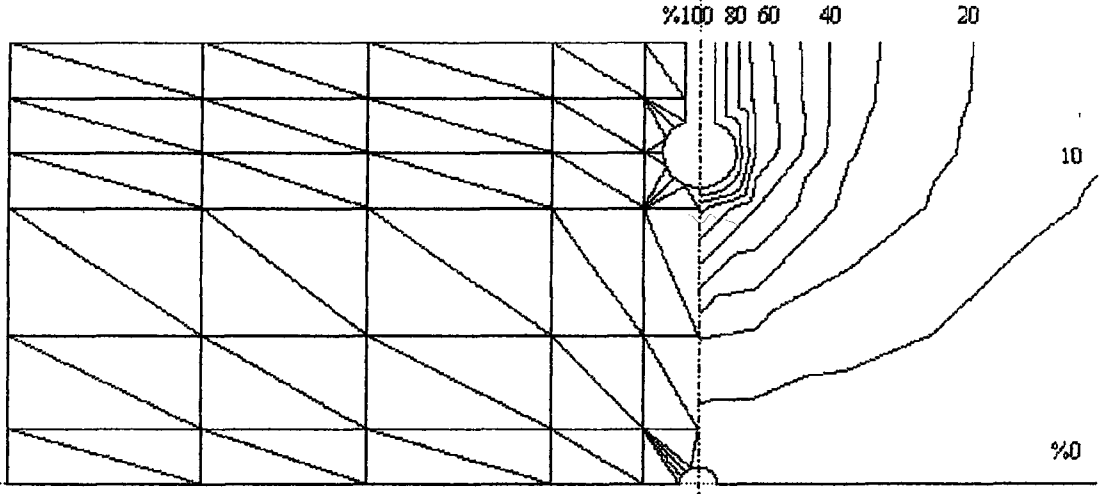
EK A



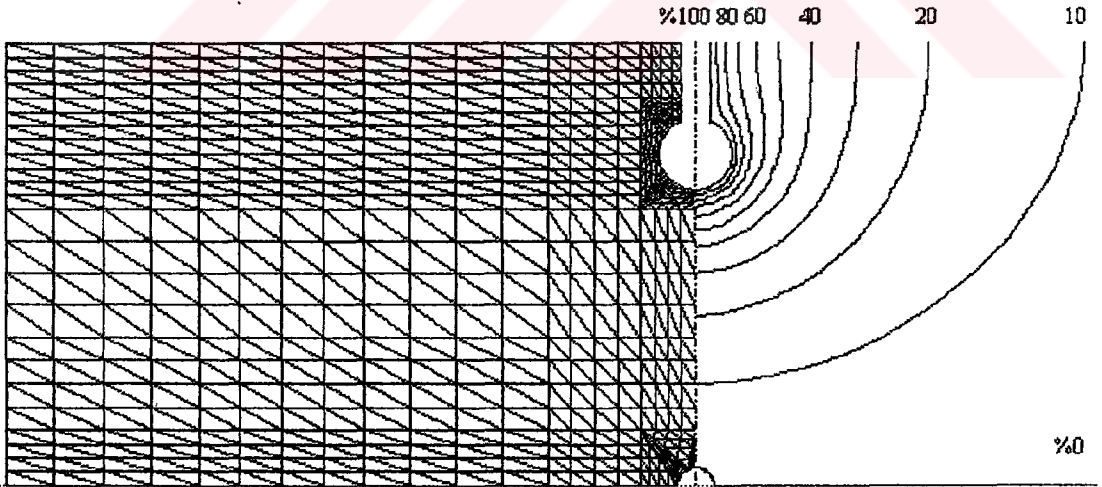
Şekil A.1. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 15 mm, 1. aşama).



Şekil A.2. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 15 mm, 3. aşama).

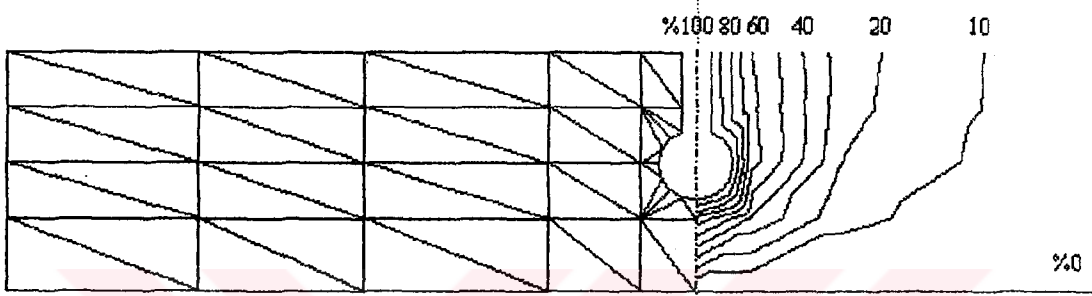


Şekil A.3. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı: 1 mm, elektrot açıklığı: 15 mm, 1. aşama).

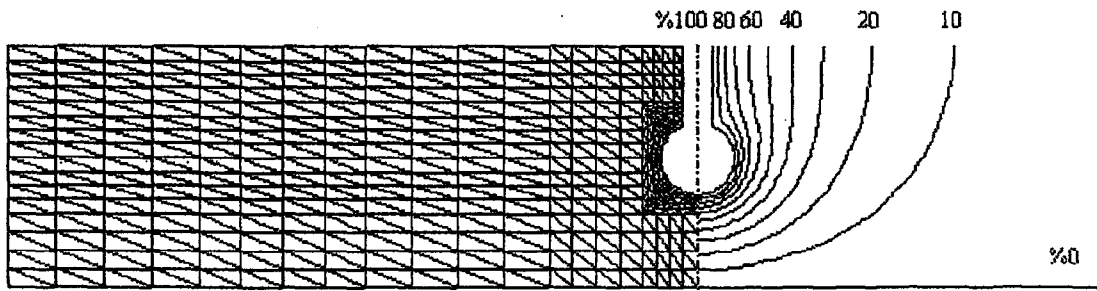


Şekil A.4. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı: 1 mm, elektrot açıklığı: 15 mm, 3. aşama).

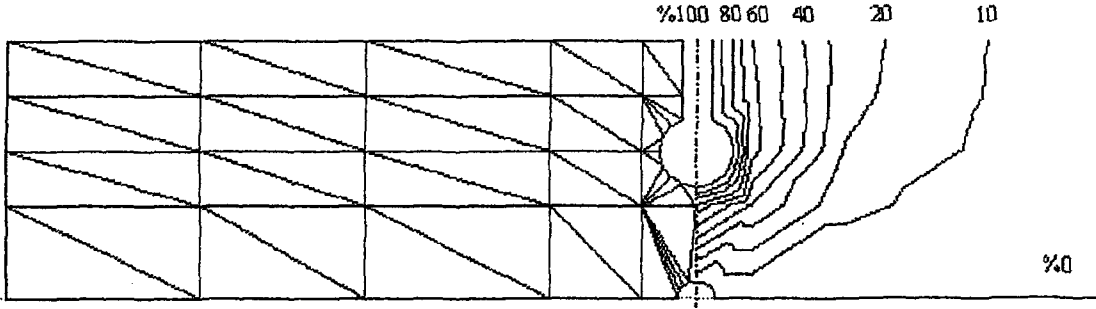
EK B



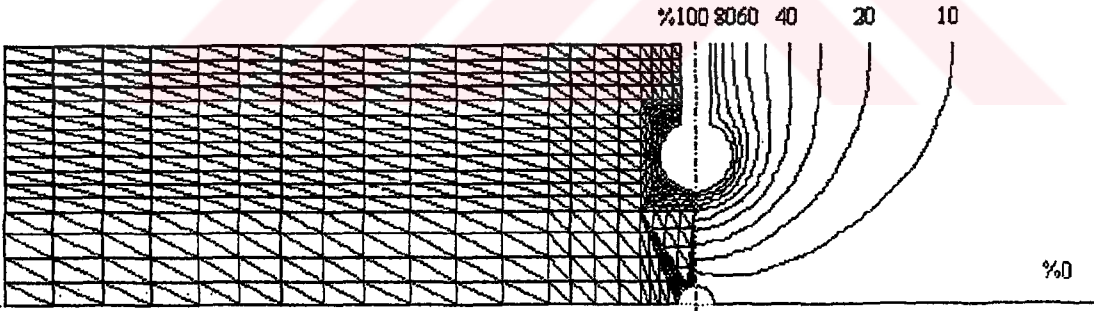
Şekil B.1. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 5 mm, 1. aşama).



Şekil B.2. Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, elektrot açıklığı: 5 mm, 3. aşama).



Şekil B.3. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı: 1 mm, elektrot açıklığı: 5 mm, 1. aşama).



Şekil B.4. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde sonlu elemanlar ağı ve eşpotansiyel çizgilerinin dağılımı (küre yarıçapı: 2 mm, pürüz yarıçapı: 1 mm, elektrot açıklığı: 5 mm, 3. aşama).

ÖZGEÇMİŞ

Hasbi İSMAİLOĞLU, 1960 yılında Yenipazar'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da sırasıyla Nuri Örs İlkokulu, 50.Yıl Oğuzhan Ortaokulu ve Pertevniyal Lisesinde tamamladı. 1979-80 öğretim yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Bölümüne girdi. 1983-84 öğretim yılı kış yarıyılı sonunda adı geçen bölümden, Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Bir süre serbest mühendis olarak çalıştıktan sonra, 1986-87 öğretim yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Elektronik ve Haberleşme Programından, 1987-88 öğretim yılında Yüksek Mühendis olarak mezun oldu. Ardından, aynı Enstitünün Elektrik Anabilim Dalında Doktora öğrenimine başladı.

1986 yılı Eylül ayından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Yüksek Gerilim Tekniği Biriminde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Y.Müh. İSMAİLOĞLU evli olup, İngilizce bilmektedir.